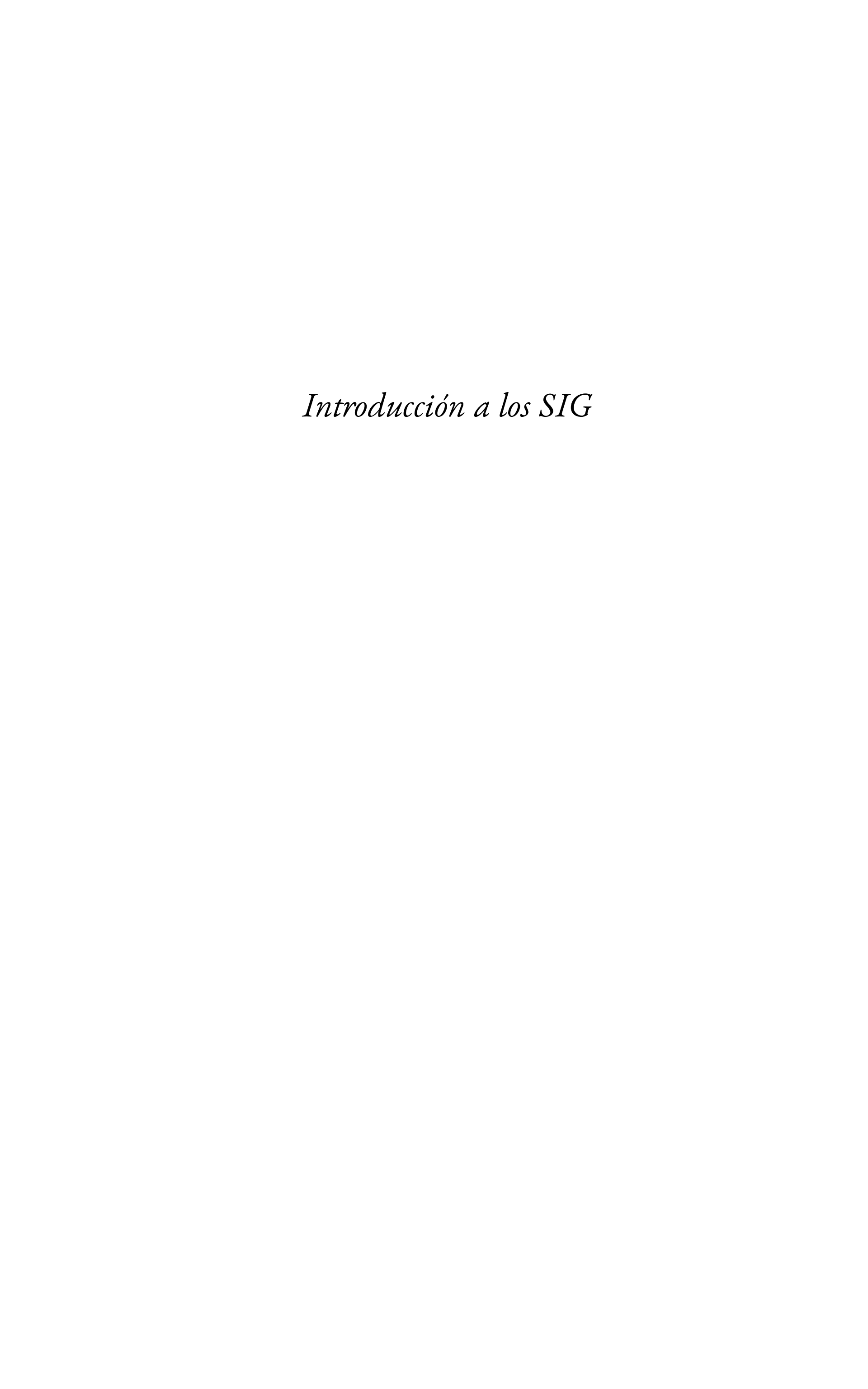


Introducción a los SIG

Víctor Olaya

Introducción a los SIG

Introducción a los SIG.

Imagen de cubierta: The Art Journal; *The Industry of All Nations Illustrated Catalogue* (London, England: Bradbury and Evans, 1851)

Prólogo

Hace ahora más de cinco años que se publicó la primera versión de *Sistemas de Información Geográfica*, un libro libre sobre fundamentos de SIG en español, y apenas unos meses desde que apareció la segunda. El libro ha tenido una acogida excelente, y mi intención es seguir manteniéndolo actualizado en la medida que sea posible, reflejando los avances que, a buen seguro, van a producirse en el campo de los SIG.

Existe, no obstante, un obstáculo importante para que el libro alcance a todos los públicos: su tamaño. Por su completitud, y por la complejidad propia de la disciplina, el libro es un volumen de más de 800 páginas cargadas de detalle. La segunda versión se presenta en un único tomo, frente a los dos en que consistía la primera, pero aún así sigue quedando como una obra de consulta demasiado extensa para leerse de principio a fin. Para el lector que comienza a introducirse en el ambito de los SIG y no busca especializarse, resulta un volumen intimidante y es, no hay duda, difícil de abordar.

Este libro intenta ser una alternativa a la obra completa, de tal forma que resulte más accesible para quienes desean tener una perspectiva global de la disciplina de los SIG, sin entrar en detalles demasiado específicos. Es, basicamente, una versión resumida de aquel, pensada con la idea de usarse no como libro

de consulta, sino como libro de lectura. Además de ser más breve, se presenta en un formato más adecuado para esta clase de propósito, con algunas modificaciones en su enfoque y con menos contenido gráfico.

He respetado en líneas generales la estructura de los capítulos, de modo que es fácil para el lector que desee profundizar en uno de ellos encontrar este en el libro completo. Desde ese punto de vista, puede entenderse este libro como una especie de «índice» de su hermano mayor, un índice, no obstante, prolijo y con suficiente información como ofrecer al lector una visión detallada del mundo de los SIG.

Este es también, por supuesto, un libro libre, que espero que progrese de una forma dinámica gracias a la contribución de sus lectores. Si encuentras cualquier error o quieres colaborar en mejorar estas páginas, no dudes en escribirme a `volayaf@gmail.com`.

Introducción a los SIG

¿Qué es un SIG?

La mayor parte de la información que manejamos en cualquier tipo de disciplina está georreferenciada. Es decir, se trata de información a la cual puede asignarse una posición geográfica, y es por tanto información que viene acompañada de otra información adicional relativa a su localización.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta para trabajar con información georreferenciada. En particular, un SIG es un sistema que permite la realización de las siguientes operaciones:

- Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales.
- Análisis de dichos datos. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre la componente temática (el valor o el elemento en sí).
- Generación de documentos tales como mapas, informes, gráficos, etc.

Un SIG representa un paso más allá de los mapas clásicos. Mientras que un mapa es una representación de un conjunto de datos espaciales, y aunque esta representación resulta de enorme

importancia, en el entorno de un SIG no es sino un elemento más de un conjunto de ellos. El SIG no incluye solo los datos y la representación, sino también las operaciones que pueden hacerse sobre el mapa, que no son ajenas a este sino partes igualmente de todo ese sistema.

Un SIG es una herramienta versátil y de amplio alcance, y hoy día la gran mayoría de disciplinas se benefician del uso de SIG de uno u otro modo. Una de las principales razones por las que esto sucede es el carácter integrador de los SIG. Los siguientes son algunos de los contextos principales en los que un SIG ejerce tal función integradora.

- SIG como integrador de información. Un nexo común entre la mayoría de disciplinas es el hecho de que sus objetos de estudio están asociados a una localización en el espacio. Esto va a permitir combinarlas y obtener resultados a partir de un análisis común. El SIG es, en este contexto, el marco necesario en el que incorporar esa información georreferenciada y trabajar con ella.
- SIG como integrador de tecnologías. Una gran parte de las tecnologías que han surgido en los últimos años (y seguramente de las que surjan en los próximos) se centran en el aprovechamiento de la información espacial, y están conectadas en mayor o menor medida a un SIG para ampliar su alcance y sus capacidades. Por su posición central en el conjunto de todas las tecnologías, los SIG cumplen además un papel de unión entre ellas, conectándolas y permitiendo una relación fluida alrededor de las funcionalidades del propio SIG.
- SIG como integrador de personas. Las funciones básicas que un SIG ha de cumplir cubren en realidad un rango amplio de trabajo, y engloban las necesidades de usuarios que con anterioridad no tenían entre sí un marco de trabajo común tan definido. Esto tiene como consecuencia que existe una mejor coordinación entre ellos, pues es la propia herramienta quien establece las características de la relaciones existentes,

y estas no dependen ya únicamente del propio ámbito de aplicación.

- SIG como integrador de teorías y fundamentos. En un principio, podemos entender un SIG como la unión de dos ciencias: la geografía y la informática. Sin embargo, un análisis más detallado nos revela que un SIG incorpora elementos de muchas ciencias distintas, como pueden ser las disciplinas relacionadas con la tecnología y el manejo de información (informática, diseño de bases de datos, tratamiento digital de imágenes), las dedicadas al estudio de la Tierra desde un punto de vista físico (geología, oceanografía, ecología), las dedicadas al estudio de la Tierra desde un punto de vista social y humano (antropología, geografía, sociología), las dedicadas al estudio del entendimiento humano (ciencias del conocimiento, psicología) o las disciplinas que tradicionalmente han realizado una integración de conocimientos de otros ámbitos distintos, entre las que cabe destacar la geografía.
  El término geomática, formado a partir de los vocablos *geografía* e *informática*, se emplea con frecuencia para hacer mención a todo ese grupo de ciencias relacionadas con los SIG.

Con todo lo anterior, se tiene que SIG es un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica, y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados.

Desde otro punto de vista, un SIG puede considerarse compuesto de cinco bloques fundamentales.

- Datos. Los datos son necesarios para hacer que el resto de componentes de un SIG cobre sentido y puedan ejercer su papel en el sistema. La información geográfica, la verdadera razón de ser los SIG, reside en los datos, y es por ello que el conocimiento exhaustivo de los datos, su naturaleza, su procedencia, su calidad, así como su gestión y almacenamiento,

resulta obligado para una buena comprensión los propios SIG.

- Análisis. El análisis es una las funcionalidades básicas de los SIG, y una de las razones fundamentales que llevaron al desarrollo de estos. Un ordenador es una herramienta con enorme capacidad de cálculo, y esta puede aplicarse a los datos espaciales para obtener resultados de muy diversa índole.
  En mayor o menor medida, un SIG siempre incorpora una serie de formulaciones que permiten la obtención de resultados y el análisis de los datos espaciales. Las ventajas de la incorporación de todos estos procesos en una única herramienta, el SIG, van desde la automatización de tareas a la aparición de nuevos procesos que producen resultados que no podrían ser obtenidos de otro modo.
- Visualización. Cualquier tipo de información puede ser representada de forma gráfica, lo cual facilita la interpretación de dicha información o parte de esta. En el caso particular de la información geográfica, la visualización no solo es una forma más de trabajar con esa información, sino que resulta la forma principal, por ser aquella a la que estamos más acostumbrados gracias al uso de mapas.
  Al contrario que un mapa, que de por sí es de naturaleza gráfica, en un SIG trabajamos con datos de tipo puramente numérico. Para poder presentar una utilidad similar a la de un mapa, un SIG debe incluir capacidades que generen representaciones visuales a partir de esos datos numéricos.
  La visualización de la información geográfica se rige por los mismos conceptos y principios que se emplean para la confección de cartografía impresa, y estos deben ser conocidos por el usuario de SIG, ya que una de las tareas de este es el diseño cartográfico y las preparación de los elementos de visualización para poder realizar su trabajo sobre las representaciones creadas.

- Tecnología. Se incluyen en este elemento tanto el *hardware* sobre el que se ejecutan las aplicaciones SIG, como dichas aplicaciones, es decir el *software* SIG. Además de la propia plataforma, el *hardware* incluye una serie de periféricos habituales en el trabajo con SIG, como son los periféricos para entrada de datos geográficos y creación de cartografía.
- Factor organizativo. Engloba los elementos relativos a la coordinación entre personas, datos y tecnología, o la comunicación entre ellos, entre otros aspectos. Con la creciente complejidad de los SIG, la gestión de las relaciones entre sus elementos es cada vez más importante.

A lo largo de este libro, detallaremos cada uno de estos bloques en los capítulos correspondientes.

Historia de los SIG

El desarrollo sufrido por los SIG desde sus orígenes hasta nuestros días es enorme. La popularización de las tecnologías y los esfuerzos de desarrollo llevados a cabo por un amplio abanico de ciencias beneficiarias de los SIG, todos han contribuido a redefinir la disciplina e incorporar elementos impensables entonces.

Podemos situar el origen de los SIG al inicio de la década de los 60, como resultado de unos factores que convergen para dar lugar al desarrollo de estos. Dichos factores son principalmente dos: la necesidad creciente de información geográfica y de una gestión y uso óptimo esta, y la aparición de los primeros computadores.

Las bases para la futura aparición de los SIG las encontramos algunos años antes de esa década de los 60, con el desarrollo de nuevos enfoques en cartografía, tales como la geografía cuantitativa, que parecen predecir las necesidades futuras que un manejo informatizado de esta traerá.

La primera experiencia relevante en la que se combinan geografía e informática la encontramos en 1959, cuando Waldo Tobler define los principios de un sistema denominado MIMO (map in–map out) con la finalidad de aplicar los ordenadores al campo de la cartografía. En él, establece los principios básicos

para la creación de datos geográficos, su codificación, análisis y representación dentro de un sistema informatizado.

El primer Sistema de Información Geográfica formalmente desarrollado aparece en Canadá. Este sistema, denominado CGIS (Canadian Geographical Information Systems), fue desarrollado a principios de los 60 por Roger Tomlinson, popularmente conocido como el «padre del SIG».

A mediados de los 60, las aplicaciones SYMAP y GRID sientan respectivamente las bases de los dos principales enfoques a la hora de manejar información geográfica: el enfoque raster y el enfoque vectorial. Ambas alternativas serán explicadas con detalle más adelante en este libro. Los conceptos básicos para el análisis dentro del SIG ráster los establece poco despues Dana Tomlin, desarrollando lo que se conoce como álgebra de mapas.

Durante los años sesenta, se produce un gran desarrollo de los SIG a partir de esos elementos iniciales, y el SIG comienza a incorporarse a la comunidad cartográfica, dejando de ser una herramienta experimental.

La evolución de los SIG desde entonces recorre sucesivas etapas, avanzando muy rápidamente ante la influencia de numerosos factores externos. Esta evolución tiene lugar en el propio SIG como disciplina, en las tecnologías que lo sustentan, en los datos, así como en las técnicas y formulaciones.

La evolución de los SIG como disciplina

Los SIG eran en origen una mera combinación de elementos de cartografía cuantitativa, enlazados con los sistemas informáticos de la época. Se trataba de un territorio propio de cartógrafos y geógrafos que intentaban adaptar sus conocimientos y necesidades a las tecnologías que por aquel entonces comenzaban a surgir. No obstante, desde aquellos orígenes los cambios han sido muy grandes, y se han incorporado al ámbito de los SIG un gran número de otras disciplinas cuya aportación e influencia

puede ser equivalente o incluso superior a la de la cartografía o la geografía.

Coincidiendo con la etapa inicial del desarrollo de los SIG, empieza a aparecer una preocupación por el entorno que tiene consecuencias muy favorables para el desarrollo de todas las ciencias relacionadas, la gran mayoría de las cuales son o serán usuarias directas de SIG. El SIG comienza a integrarse paulatinamente en las tareas de gestión del medio, como un apoyo imprescindible a la hora de analizar este.

Al principio de la década de los 70, siendo ya claro que los SIG son herramientas con gran futuro, aparecen no solo los esfuerzos de desarrollo y estabilización de la disciplina, sino todos los restantes que dan entidad propia a la prometedora ciencia de la información geográfica con base informática. Comienzan a celebrarse conferencias y simposios sobre SIG, y estos pasan a formar parte de los *curricula* universitarios. En los años 80, se consolidan las revistas y foros especializados, que habrán de llevar la disciplina a un público más amplio.

En el aspecto comercial, la industria del SIG se consolida también en los años 70. ESRI (Environmental Systems Research Institute), empresa pionera y líder del sector hasta el día de hoy, se funda en 1969, y sus productos tienen gran importancia a la hora de convertir los SIG en un elemento de consumo. El primer SIG de código abierto, GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), aparece en 1985.

El mayor avance en la incorporación de los SIG a entornos no profesionales tiene lugar en la primera década del siglo XXI, con la aparición de servicios de cartografía tales como Google Maps. La popularización de los navegadores GPS, que incorporan tanto elementos de representación como de análisis propios de los SIG, son otro buen ejemplo de la proliferación del SIG entre un público no especializado.

Tres son los bloques principales del desarrollo informático con una influencia más marcada en el campo de los Sistemas de Información Geográfica:

- Salidas gráficas. La evolución de las capacidades gráficas, intensa desde sus inicios hasta nuestros días y aún muy activa, ha sido seguida de cerca por los SIG, que progresivamente van incorporando mejoras tanto en la representación en pantalla como en la generación de mapas impresos.
- Almacenamiento y acceso de datos. El aumento en el tamaño de los datos manejados en el SIG ha debido acompañarse de mejoras en la capacidad de almacenamiento, así como en la de lectura, para poder garantizar un uso fluido.
- Entrada de datos. Los datos geográficos utilizados en los primeros años de los SIG eran datos en papel que se digitalizaban y almacenaban mecánicamente en tarjetas perforadas en un único proceso mecánico. Desde esos sistemas mecánicos de tarjetas hasta los modernos equipos, la aparición de *scanners* de gran precisión y técnicas de digitalización automáticas, entre otros, ha cambiado completamente el ámbito de la entrada de datos para su uso en un SIG.

Además del avance de estos factores, la evolución general de los ordenadores afecta a todos los elementos de *software* que se ejecutan sobre ellos. De las grandes computadoras se pasa a los ordenadores personales, y los programas tales como los SIG realizan también esa transición de una a otra plataforma.

La elaboración y análisis de cartografía se convierte a finales de los años 80 en una tarea que puede ya llevarse a cabo en equipos personales (PC) de bajo coste, lejos de las grandes máquinas y equipos dedicados de alto coste.

La evolución de las plataformas no se detiene ahí. Las tendencias actuales apuntan a llevar los SIG de forma genérica a plataformas móviles tales como teléfonos o tabletas, especialmente indicadas para la toma de datos en campo. La combinación de estos últimos con las tecnologías de posicionamiento global como el GPS se demuestra altamente práctica en este aspecto.

La aparición de Internet es un hecho que ha modificado todos los aspectos de la sociedad actual, estén relacionados o no con ámbito científico. El primer uso relacionado con el SIG o la distribución de cartografía lo encontramos en 1993, con la aparición de *Xerox PARC*, el primer servidor de mapas. El primer atlas digital en linea, el Atlas Nacional de Canadá, se encuentra disponible desde 1994. Mas recientemente, ya en este siglo, los concepto de la Web 2.0 se adaptan al ámbito de los SIG y facilitan la aparición de lo que se conoce como Web Mapping.

La evolución de los datos

Las primeras bases de datos geográficas contenían mapas escaneados y elementos digitalizados en base a estos. A partir de este punto, van apareciendo nuevas fuentes de datos cuya estructura es más adecuada para su tratamiento informatizado, y al tiempo que los SIG se adaptan a estas, surge una relación bidireccional que resulta beneficiosa para ambos.

Un avance primordial en este sentido lo constituye el lanzamiento de los primeros satélites de observación terrestre. Las técnicas existentes para la toma de fotografías aéreas, desarrolladas principalmente con fines militares durante la Primera Guerra Mundial (aunque iniciadas a mitad del siglo XIX con la toma de fotografías desde globos aerostáticos), pasan a aplicarse a escala global con la aparición de satélites destinados a estos efectos. En 1980 se funda SPOT, la primera compañía mundial en ofrecer con carácter comercial imágenes procedentes de satélite para toda la superficie terrestre.

Las tecnologías de posicionamiento y localización son otra fuente de datos de primer orden. En 1981, el sistema GPS pasa a ser plenamente operativo, y en 2000 se amplía la precisión de este para uso civil.

Al igual que las aplicaciones, los distintos tipos de datos geográficos digitales se van asentando y popularizando, recibiendo progresivamente más atención y medios. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) publica en 1976 los primeros Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), en respuesta a la gran importancia que este tipo de dato tiene dentro del nuevo contexto del análisis geográfico. En el año 2000 se publican los datos de la *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), con información altitudinal de un 80 % de la superficie terrestre a una resolución de un segundo de arco (aproximadamente, 30 metros).

La aparición de nuevas técnicas tales como el LiDAR abre nuevos caminos en cuanto a la precisión que puede obtenerse en la caracterización del terreno, posibilitando nuevos usos y análisis antes no planteados.

La evolución de los datos no es solo una evolución técnica, sino también de carácter social y organizativo. Se empieza a entender que resulta necesario formular estrategias adecuadas para la gestión de los datos espaciales, y se desarrollan las denominadas Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE). El ejemplo más destacado de estas es la IDE Nacional de los Estados Unidos (NSDI), de 1994. En Europa, la directiva INSPIRE, de 2007, pretende la creación de una infraestructura similar.

Muchos de estos desarrollos y actividades se adhieren a las especificaciones establecidas por el *Open GIS Consortium* (OGC), un consorcio internacional fundado en 1994 para homogeneizar el empleo y difusión de los datos geográficos.

Una vez que se implementan los primeros SIG y se suplen las necesidades de análisis y gestión de datos espaciales que motivaron su aparición, comienza el proceso de desarrollar nuevas técnicas y planteamientos que permiten ir más allá en dicho análisis.

Los antecedentes del análisis espacial son relativamente recientes. En 1854 John Snow realizó la que puede considerarse como una de las primeras experiencias cartográficas analíticas, al utilizar mapas de puntos para efectuar sus deducciones y localizar en Inglaterra la fuente de un brote de cólera.

En su libro *Design with Nature* (1969), Ian McHarg define los elementos básicos de la superposición y combinación de mapas, que, como veremos más adelante, son los que se aplican tanto en el análisis como en la visualización de las distintas *capas* de datos geográficos en un SIG.

Un desarrollo especialmente relevante es el experimentado por el análisis del relieve, una disciplina que con la aparición de los SIG sufre un salto cualitativo muy importante. La orografía clásica, con un enfoque tradicionalmente sustentado en la geología y el análisis geomorfológico, va dando lugar a una ciencia cada vez más cuantitativa centrada en el análisis morfométrico del relieve.

Junto con la componente analítica, otros elementos de la práctica cartográfica evolucionan de forma similar. En 1819, Pierre Charles Dupin crea el primer mapa de coropletas. Con la llegada de los SIG, este tipo de mapas se convertirán en una forma de representación muy popular.

El avance en el desarrollo de las aplicaciones de diseño asistido por ordenador (CAD), y en general de las representaciones gráficas por ordenador, impulsó igualmente la aparición y evolución posterior de una nueva disciplina: la geometría computacional. Sobre esta se fundamenta el análisis vectorial dentro

de un SIG, y también parte de los mecanismos que este usa para la representación gráfica de elementos.

Fundamentos geodésicos y cartográficos

Puesto que los SIG heredan conceptos utilizados anteriormente en la elaboración de mapas, es necesario conocer estos para hacer buen uso de las herramientas que un SIG ofrece. En este sentido, resultan fundamentales los elementos de la geodesía y la cartografía, sin los cuales no es posible entender el contexto de un SIG.

Conceptos geodésicos básicos

La característica principal de la información georreferenciada es que tiene una localización en el espacio, particularmente en el espacio terrestre. Esta localización se ha de dar por medio de unas coordenadas que la definan de forma adecuada, lo cual implica la necesidad de establecer un sistema en base al cual expresar dichas coordenadas.

La geodesia es la ciencia encargada de proveer el marco teórico en el que fundamentar lo anterior, y su objeto de estudio es la forma de la Tierra. La geodesia, en sus diversas ramas, proporciona métodos y conceptos que permiten la utilización rigurosa de coordenadas.

La necesidad del estudio geodésico surge por el hecho de que la Tierra no es plana, y cuando el territorio que pretendemos estudiar es lo suficientemente extenso, la curvatura de la Tierra no puede ser ignorada. Este es el caso que vamos a encontrar cuando trabajemos con un SIG, y es por ello que los SIG implementan los elementos necesarios para poder efectuar un manejo de la información geográfica riguroso y acorde con los conceptos de la geodesia.

Uno de los objetivos principales de la geodesia es establecer un sistema de referencia y definir un conjunto de puntos (conocidos como vértices geodésicos) cuyas coordenadas en dicho sistema sean conocidas con una precisión elevada. Posteriormente, y en base a esos puntos, los cuales forman una red geodésica, se pueden calcular las coordenadas de cualquier punto en el sistema de referencia definido.

Superficies de referencia

Dos conceptos básicos para esta tarea: el elipsoide de referencia y el geoide.

La Tierra tiene forma esférica, aunque no es una esfera perfecta, sino que está achatada, constituyendo lo que se conoce como elipsoide. Sobre un elipsoide, el radio de la Tierra ya no es constante, y depende del emplazamiento. Asimilar la Tierra a un elipsoide es más preciso que suponer la Tierra con una forma perfectamente esférica, y es necesario a la hora de elaborar cartografía de zonas no muy extensas.

Una vez que se dispone de una expresión teórica para la forma de la Tierra, el siguiente paso es la determinación de los parámetros que definen esta. En el caso de utilizar la esfera, hay que calcular su radio. En el caso de asumir el elipsoide como forma de referencia, deben determinarse las medidas de los semiejes menor y mayor.

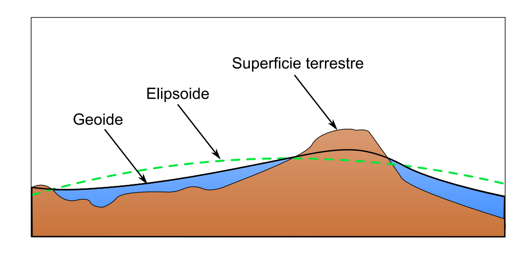


Figura 3.1: Tres superficies fundamentales: superficie real de la Tierra, geoide y elipsoide (Adaptado de Wikipedia).

Por razones históricas, existen numerosos elipsoides, derivados del trabajo de los geodestas en diferentes épocas y lugares. Los primeros elipsoides generales, que permiten ser usados en toda la superficie terrestre, aparecen hace aproximadamente un siglo, con objeto de disponer de una referencia internacional que facilite el uso de cartografía en las distintas zonas del planeta. El elipsoide WGS–84 es uno de los más empleados en la actualidad, ya que es el utilizado por el sistema GPS.

El geoide es la otra superficie de referencia, definida como la superficie tridimensional en cuyos puntos la atracción gravitatoria es constante. Se trata de una superficie equipotencial que resulta de suponer los océanos en reposo y a un nivel medio y prolongar estos por debajo de la superficie terrestre.

Al igual que en el caso de los elipsoides, existen diversos geoides de referencia, y estos no son constantes en el tiempo sino que evolucionan para adaptarse a las modificaciones que tienen lugar sobre la superficie terrestre.

La figura 3.1 muestra una comparación esquemática entre las tres superficies: superficie real de la Tierra, geoide y elipsoide.

En un elipsoide general, tanto la posición de su centro de gravedad como de su plano ecuatorial coinciden con los terrestres. Por el contrario, cuando el elipsoide es local, estas propiedades

no han de cumplirse necesariamente, y el elipsoide a solas resulta insuficiente, ya que carecemos de información sobre su posicionamiento con respecto a la superficie terrestre.

Surge así el concepto de datum, que es el conjunto formado por una superficie de referencia (el elipsoide) y un punto en el que «enlazar» este al geoide. Este punto se denomina punto fundamental, y en él el elipsoide es tangente al geoide. La vertical al geoide y al elipsoide son idénticas en el punto fundamental.

Para un mismo elipsoide pueden utilizarse distintos puntos fundamentales, que darán lugar a distintos datum y a distintas coordenadas para un mismo punto.

Sistemas de coordenadas

Una vez hemos definido un modelo para definir la forma de la Tierra, podemos establecer un sistema de codificar cada una de las posiciones sobre su superficie y asignar a estas las correspondientes coordenadas. Para ello, encontramos dos opciones: utilizar los elementos de la geometría esférica y con estos definir el sistema de referencia, o utilizar la geometría plana, para lo cual será necesario un mecanismo de proyección de coordenadas que permita situar los elementos de la superficie del elipsoide sobre una superficie plana.

El sistema de coordenadas geográficas es un sistema de coordenadas esféricas mediante el cual un punto se localiza con dos valores angulares: latitud y longitud. Las lineas de igual latitud o longitud se denominan paralelos y meridianos respectivamente.

Las coordenadas geográficas resultan de gran utilidad, especialmente cuando se trabaja con grandes regiones. No obstante, no se trata de un sistema cartesiano, y tareas tales como la medición de áreas o distancias son mucho más complicadas. Para poder crear cartografía y simplificar gran número de operaciones posteriores, necesitamos coordenadas cartesianas. El proceso de

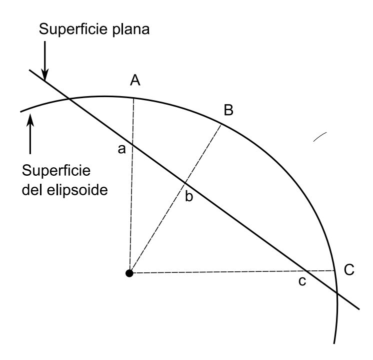


Figura 3.2: Esquema del concepto de proyección. A los puntos A, B y C sobre la superficie del elipsoide se les asocian equivalentes a, b y c sobre un plano.

asignar una coordenada plana a cada punto de la superficie de la Tierra (que no es plana) se conoce como proyección cartográfica.

La superficie de la esfera no es desarrollable, es decir, no puede convertirse en un plano. Por ello, es necesario disponer de una metodología para pasar puntos desde la superficie curva al plano, tal y como el que se muestra en la figura 3.2.

En el caso de la figura, los puntos se proyectan directamente sobre un plano. Otra opción es proyectarlos sobre una superficie tridimensional que, al contrario que la esfera, sea desarrollable. Las más habituales son el cilindro y el cono, que dan lugar a las proyecciones cónicas y cilíndricas.

Puede apreciarse en la figura que se producen distorsiones al realizar la proyección. Por ejemplo, la distancia entre los puntos A y B no es igual a la existente entre los puntos a y b. Con independencia de las características propias de la proyección, siempre existen distorsiones, por ser la de la esfera una superficie no desarrollable. Estas distorsiones se conocen como anamorfosis .

Según las propiedades métricas que se conserven, las proyecciones pueden ser equiárea (mantienen una escala constante),

conformes (mantienen los ángulos y la forma de los objetos) o equidistantes (mantienen las distancias).

La elección de una u otra proyección es función de las necesidades concretas de cada caso de uso.

En la actualidad, una de las proyecciones más extendidas en todos los ámbitos es la proyección universal transversa de Mercator, la cual da lugar al sistema de coordenadas UTM. Este sistema no es simplemente una proyección, sino un sistema completo para cartografiar la practica totalidad de la Tierra. Para ello, esta se divide en una serie de zonas rectangulares mediante una cuadricula y se aplica una proyección y unos parámetros geodésicos concretos a cada una de dichas zonas. En su forma actual, emplea un único elipsoide (WGS–84).

Con el sistema UTM, las coordenadas de un punto no se expresan como coordenadas terrestres absolutas, sino mediante la zona correspondiente y las coordenadas relativas a la zona UTM en la que nos encontremos.

La cuadricula UTM tiene un total de 60 husos numerados entre 1 y 60, cada uno de los cuales abarca una amplitud de 6°de longitud. El huso 1 se sitúa entre los 180°y 174°O, y la numeración avanza hacia el Este.

En latitud, cada huso se divide en 20 zonas, que van desde los 80°S hasta los 84°N. Estas se codifican con letras desde la C a la X, no utilizándose las letras I y O por su similitud con los dígitos 1 y 0. Cada zona abarca 8 grados de longitud, excepto la X que se prolonga unos 4 grados adicionales.

Una zona UTM se localiza, por tanto, con un número y una letra, y es en función de la zona como posteriormente se dan las coordenadas que localizan un punto. Estas coordenadas se expresan en metros y expresan la distancia entre el punto y el origen de la zona UTM en concreto. El origen de la zona se sitúa en el punto de corte entre el meridiano central de la zona y el ecuador.

Para evitar la aparición de números negativos, se considera que el origen no tiene una coordenada X de 0 metros, sino de 500000, y una coordenada Y de 10000000 metros, lo cual hace que todas las coordenadas referidas a él sean positivas.

Transformación y conversión de coordenadas

Una situación muy habitual en el trabajo con un SIG es disponer de cartografía en varios sistemas de coordenadas, o bien en un mismo sistema pero con parámetros diferentes (por ejemplo, diferente datum). Para poder emplear toda esa cartografía de forma conjunta, resulta necesario trabajar en un sistema único y bien definido, lo cual hace necesario convertir al menos una parte de ella. Cuando el datum es distinto en los sistemas de origen y destino, la conversión de coordenadas se conoce como transformación de coordenadas.

Las operaciones de transformación y conversión aparecen en los SIG como funcionalidades que permiten modificar los datos geográficos, reemplazando sus coordenadas por coordenadas en otro sistema de coordenadas. Igualmente, aparecen como funcionalidades de representación, permitiendo la conversión al vuelo, es decir, en tiempo real. En este caso, un dato en un sistema de coordenadas se puede representar en cualquier otro sin necesidad de una conversión previa, con lo que puede usarse conjuntamente con datos en un sistema de coordenadas distinto.

Para facilitar el uso de sistemas de referencia, existen proyectos de codificación de estos, de forma que cada sistema existente puede identificarse de forma sencilla mediante un código. El más extendido de estos es el sistema de codificación EPSG.

Conceptos cartográficos básicos

De entre los conceptos fundamentales de la cartografía que todo usuario de SIG ha de conocer, destaca el de escala. La escala

es la relación de tamaño existente entre el mapa que se obtiene al desarrollar nuestra superficie de proyección (de tamaño acorde con el objeto proyectado, esto es la Tierra) y el que finalmente manejamos, de tamaño más reducido. Conociendo esta relación podemos conocer las verdaderas magnitudes de los elementos que vemos en el mapa, ya que podemos convertir las medidas hechas sobre el mapa en medidas reales. Es importante recordar que esas medidas no son tan «reales», puesto que la propia proyección las ha distorsionado —lo cual no debe olvidarse—, pero sí que son medidas en la escala original del objeto cartografiado.

La escala se expresa habitualmente como un denominador que relaciona una distancia medida en un mapa y la distancia que esta medida representa en la realidad. Por ejemplo, una escala 1:50000 quiere decir que 1 centímetro en un mapa equivale a 50000 centímetros en la realidad, es decir a 500 metros. Este valor se conoce como escala numérica.

Independientemente del tipo de proyección, la escala es completamente cierta únicamente en determinadas partes del mapa. En otros puntos de este, la escala varía. La relación entre la escala en esos puntos y la escala numérica se conoce como factor de escala.

Aunque tradicionalmente se entiende la escala como un concepto asociado a la representación, los datos geográficos tienen una escala inherente que no es función de dicha representación, sino del detalle con que han sido tomados. En este sentido es más conveniente entender la escala como un elemento relacionado con la resolución de los datos, es decir, con el tamaño mínimo cartografiado. Esta concepción no es en absoluto propia de los SIG, ya que deriva de las representaciones clásicas y los mapas impresos. Se sabe que el tamaño mínimo que el ojo humano es capaz de diferenciar es del orden de 0,2 mm. Aplicando a este valor la escala a la que queremos crear un mapa, tendremos la mínima distancia sobre el terreno que debe medirse.

Es importante ser consciente de la limitación que la escala considerada a la hora de la toma de datos (conocida como escala operacional) impone, especialmente en el contexto de un SIG. En un SIG, podemos aumentar el tamaño en pantalla de una cierta información geográfica, variando la escala de representación (también conocida como escala cartográfica), pero ello no modifica la escala operacional. Por mucho que ampliemos no vamos a ver más detalles, ya que para ello sería necesario tomar más datos.

Un tipo de datos particulares con los que se trabaja en un SIG, los datos *ráster*, tienen a su vez un parámetro de resolución (el tamaño de celda) ligado a la escala.

Relacionado con el concepto de escala encontramos la denominada generalización cartográfica. Generalizar implica expresar alguna idea o información de forma más resumida, de tal modo que esta sea comprensible y pueda aprovecharse de la mejor manera posible. La generalización es necesaria en un SIG para representar datos a una escala menor que su escala operacional, ya que a las limitaciones de la visión humana han de sumarse las limitaciones de resolución que los dispositivos presentan. Por ejemplo, no tiene sentido representar el callejero de una ciudad a una escala pequeña como la que se utilizaría para representar un mapa mundial, ya que cada pequeño punto de la pantalla contendría un gran número de calles. Además de obtener un resultado inservible, se consumirían recursos en efectuar todos los cálculos necesarios para producir esa representación.

En ocasiones, el proceso de generalización es necesario por razones distintas a las anteriores, y requiere operaciones también distintas. Por ejemplo, podemos crear un mapa del mundo que contenga vías de comunicación, pero no todas, sino solo las principales autopistas de cada país. En este caso, no vamos a encontrar problemas con distintas carreteras que se solapan en la representación, ni tampoco un volumen excesivo de datos, pero debemos igualmente «adaptar» la representación a la escala,

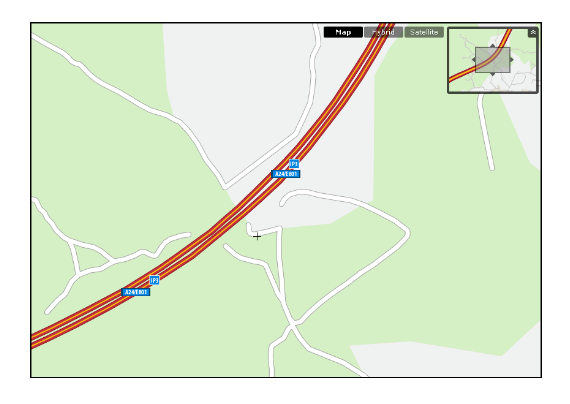


Figura 3.3: Un ejemplo de generalización por agregación. Dos carreteras prácticamente paralelas y unidas se representan como dos elementos en el mapa, pero en el localizador de la parte superior izquierda, a escala de menor detalle, se generalizan como una única (Tomado de Yahoo Maps).

es decir, efectuar algún tipo de generalización. En este caso, se representarían las carreteras con un ancho mayor del real, ya que, de otro modo, no serían apenas visibles si las representamos con su ancho correspondiente.

La generalización, por tanto, es un proceso que tiene como objetivo la producción de una imagen cartográfica legible y expresiva, reduciendo el contenido del mapa a aquello que sea posible y necesario representar. Para ello, se enfatiza lo que resulta de importancia y se suprime lo que carece de ella.

Existen diversas operaciones que se emplean en el proceso de generalización. Algunas de las más relevantes son las simplificación (representar un elemento menos complejo), la agregación (representar varios elementos como uno solo —Figura 3.3—), la exageración (representar elementos con mayor tamaño del que les corresponde) y el desplazamiento (representar en una posición modificada, para garantizar la legibilidad).

En un SIG, la generalización puede incorporarse como parte de los propios mecanismos de representación, aplicándose las transformación correspondientes en tiempo real. A partir de un juego de datos, se elaboran las representaciones según la escala a la que se estén representando. Esta solución tiene el inconveniente de producir resultados que no resultan óptimos, por ser la generalización un proceso complejo y difícil de automatizar, y, sobre todo, el de consumir gran cantidad de recursos. La generalización en este caso tiene un objetivo cartográfico, pero en lugar de hacer más fluido el trabajo con datos de gran volumen, lo hace más lento.

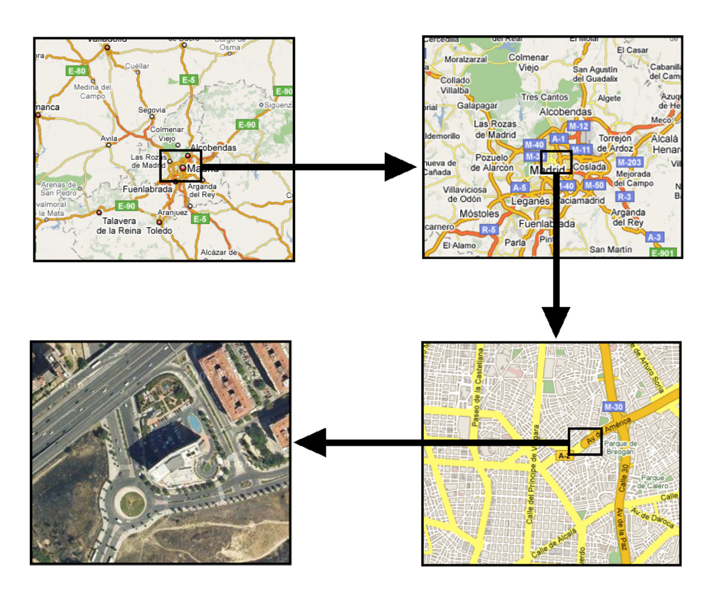


Figura 3.4: En un SIG es habitual manejar información a diferentes escalas. En función de la escala de representación, la información visualizada será una u otra.

Una solución alternativa y más adecuada de incorporar la generalización dentro de un SIG suele basarse en un enfoque multi–escalar (Figura 3.4), en el cual se maneja información de

una misma zona de estudio a diferentes escalas, y se usa en cada momento aquella que resulte más conveniente. Si se trabajara con cartografía en papel, sería equivalente a tener varios mapas de una zona a diferentes escalas.

El concepto de *capa*, que veremos más adelante y que es vital para la idea actual de un SIG, permite este manejo simultáneo de información a distintas escalas.

En el caso de imágenes, este enfoque multi–escalar implica la creación de las denominadas pirámides. En lugar de una imagen con una determinada resolución, se tiene una colección de estas con distintas resoluciones, y en función de la escala necesaria para la representación, se emplea la más adecuada.

El dato geográfico y su almacenamiento

De todos los subsistemas de un SIG, el correspondiente a los datos es el pilar fundamental que pone en marcha los restantes. Los datos son el combustible que alimenta el SIG. El subsistema de datos es, a su vez, el más interrelacionado, y está conectado de forma inseparable a todos los restantes.

Datos e Información. Tipos de información.

Existe una importante diferencia entre los conceptos de datos e información. Un SIG es un Sistema de *Información* Geográfica, pero maneja *datos* geográficos, existiendo diferencias entre estos conceptos.

Entendemos como dato al simple conjunto de valores o elementos que utilizamos para representar algo. Por ejemplo, el código 502132N es un dato.

El dato anterior podemos interpretarlo como si fuera una referencia geográfica, y cuyo significado sería entonces una latitud, en particular $50°21'32''$ Norte. Si lo interpretamos como un código que hace referencia a un documento de identificación de una persona, la información que nos aporta es en ese caso completamente distinta. El dato sería el mismo, formado por

seis dígitos y una letra, pero la información que da es diferente, ya que lo entendemos e interpretamos de manera distinta.

La información es, por tanto, el resultado de un dato y una interpretación, y el trabajo con datos es en muchos casos un proceso enfocado a obtener de estos toda la información posible.

Comprender el significado y las diferencias entre datos e información permiten entender entre otras cosas que la relación entre los volúmenes de ambos no es necesariamente constante. Por ejemplo, los datos 502132NORTE o CINCUENTA VEINTIUNO TREINTAYDOS NORTE tienen un volumen mayor que el dato 502132N, pero recogen la misma información espacial que este (suponiendo que los interpretamos como datos de latitud).

En la información geográfica se distinguen dos componentes: espacial y temática. La componente espacial hace referencia a la posición dentro de un sistema de referencia establecido, y responde a la pregunta *¿dónde?*. La componente temática responde a la pregunta *¿qué?*, y define la naturaleza del fenómeno que se produce en la localización indicada por la componente espacial.

Mientras que la componente espacial va a ser generalmente un valor numérico, pues son de esa naturaleza los sistemas de coordenadas que permiten expresar una posición concreta en referencia a un marco dado, la componente temática puede ser numérica o alfanumérica (texto). Una variable numérica puede a su vez ser de cuatro tipos: nominal, ordinal, intervalo o razón.

El tipo de variable condiciona las operaciones que pueden realizarse con un dato geográfico en función de cómo sea su componente temática.

Las diferentes formas de representar y almacenar la información, que veremos más adelante en este capitulo, dependen del tipo de variable con que se trabaje.

Un concepto a tener en cuenta en relación con las componentes de la información geográfica es la dimensión. Los elementos que registramos pueden ir desde sencillos puntos (0D) hasta volúmenes tridimensionales (3D) (Figura 4.1).

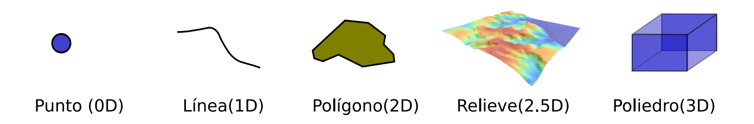


Figura 4.1: Dimensiones de la componente geográfica.

División de la información. Capas

En un SIG, la información espacial referida a una zona de estudio está dividida en varios niveles, de tal forma que, pese a coincidir sobre un mismo emplazamiento, la información sobre distintas variables se encuentra recogida de forma independiente. Es decir, en función de la componente temática se establecen distintos bloques de datos espaciales. Cada uno de estos bloques temáticos se conoce como capa (Figura 4.2).

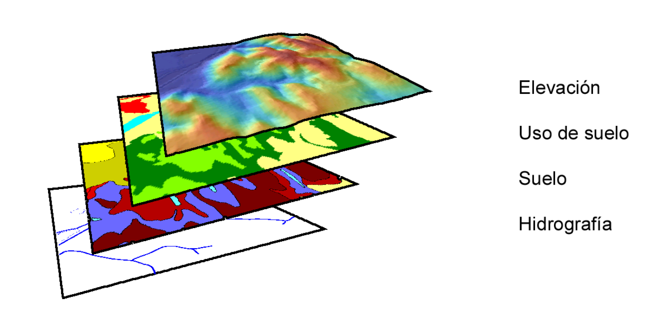


Figura 4.2: Concepto de *capa* de información geográfica dentro de un SIG.

El concepto de capa es imprescindible para comprender todo SIG, y favorece la correcta estructuración de la información y el trabajo con ella. Toda la información geográfica con que trabajemos en un SIG va a ser en forma de capas. Cada una de ellas puede abrirse de forma independiente en un SIG y utilizarse por sí misma o en conjunto con otras.

Con la cartografía clásica, no es posible (o resulta difícil e impreciso) combinar distintos tipos de información, como por ejemplo la contenida en un mapa topográfico y la existente en un mapa de tipos de suelo y otro de vegetación potencial. En el caso de un SIG, los distintos tipos de información se pueden combinar de forma sencilla y limpia, y no aparecen los mismos problemas.

La relevancia del concepto de capa como elemento fundamental de un SIG es enorme, pues constituye el marco básico sobre el que se van a llevar a cabo gran parte de las operaciones. Por ejemplo, vimos en el apartado dedicado a la generalización cartográfica cómo en un SIG podemos utilizar diferentes «versiones» de los datos correspondientes a una zona concreta, y representar una u otra de ellas en función de la escala de trabajo. Estas versiones se almacenarán como distintas capas. La capa es así la unidad fundamental no solo en términos de un área dada, sino también de una escala concreta, y permite una división de los datos óptima a todos los efectos.

La separación de la información en capas evita asimismo la redundancia de datos, ya que cada capa contiene un tipo de información concreto. En un mapa clásico se presentan siempre varias variables, algunas de ellas presentes con carácter general, tales como nombres de ciudades principales o vías más importantes de comunicación. En un SIG, al encontrarse estas variables separadas en sus correspondientes capas, es el usuario quien las combina.

El trabajo con capas permite, por tanto, una estructura más organizada y una mayor atomización de los datos, con las consecuentes ventajas en el almacenamiento, manejo y funcionalidad que esto conlleva.

Además de dividir la información geográfica en capas de acuerdo con su contenido, también dividimos esta con criterios puramente espaciales, «cortándola» en unidades menores que ocupen una región de amplitud más reducida. Este es un procedimiento similar al que encontramos en un mapa impreso, ya que el territorio de un país se encuentra cartografiado en diferentes *hojas*.

La principal cualidad de un SIG para integrar de forma transparente datos correspondientes a zonas distintas y formar un mosaico único es la separación que existe entre datos y visualización. Los datos son la base de la visualización, pero en un SIG estos elementos conforman partes del sistema bien diferenciadas. Esto quiere decir que los datos se emplean para crear un resultado visual pero en sí mismos no contienen valores relativos a esa visualización.

De este modo, es posible combinar los datos y después representarlos en su conjunto. Un proceso así no puede realizarse con un mapa ya impreso, pues este contiene ya elementos de visualización e incluso componentes cartográficos tales como una flecha indicando el Norte, una leyenda o una escala. Por ello, aunque puedan combinarse, realmente no se «funde» la información de cada uno de los mapas para conformar uno único. En un SIG, por el contrario, la visualización de cuatro o más bloques de datos puede ser idéntica a la que obtendría si todos esos datos constituyeran un único bloque.

El proceso de convertir un área geográfica y la información acerca de ella en un dato susceptible de ser incorporado a un SIG puede dividirse en tres fases:

- Establecimiento de un modelo geográfico. Es decir, un modelo conceptual de la realidad geográfica y su comportamiento.
- Establecimiento de un modelo de representación. Es decir, una forma de recoger el anterior modelo conceptual y sus características propias, reduciéndolo a una serie finita de elementos.
- Establecimiento de un modelo de almacenamiento. Es decir, un esquema de cómo almacenar los distintos elementos del modelo de representación.

Por su mayor importancia, nos centraremos en los modelos de representación. Los modelos de representación que se utilizan principalmente en un SIG son dos: modelo raster y modelo vectorial. Las capas que utilizan estos modelos se conocen como capas raster y capas vectoriales, y esta es la terminología habitual en el ámbito de los SIG para referirse a la naturaleza de una determinada capa.

Modelo ráster

El modelo ráster se basa en una división sistemática del espacio. Todo el espacio queda cubierto y caracterizado como un conjunto de unidades elementales, cada una de ellas con un valor asociado.

Lo más habitual es una división en una malla de celdas cuadradas o rectangulares. Conociendo la orientación de la malla y las dimensiones de cada una de las celdas, así como las coordenadas de al menos una de ellas, es posible conocer las coordenadas del resto en virtud de su estructura regular. Con esto, conocemos

los valores de la variable en todos los puntos del espacio cubierto por la capa. El tamaño de celda es un parámetro relacionado con la escala de trabajo de la capa, ya que define la resolución de esta y está en función de la precisión con que se han tomado los datos correspondientes.

La figura 4.3 muestra un ejemplo de una malla ráster.

10	16	23	16	9	6
14	11	18	11	18	19
19	15	13	21	23	25
20	20	19	14	38	45
24	20	20	28	18	49
23	24	34	38	45	51

Figura 4.3: Celdas de una malla ráster con sus valores asociados.

El número de valores distintos recogidos para cada celda coincide con el número de las denominadas bandas. Una banda contiene un único valor en una capa raster. Puede entenderse una capa raster de más de una banda como un conjunto de capas (cada banda sería una subcapa de ese conjunto), teniendo en todas ellas la malla de celdas las mismas características espaciales, y presentandose el conjunto como un único elemento.

El ejemplo más claro de uso del modelo raster lo encontramos en las imágenes. Una imagen digital se compone de una malla de elementos (denominados píxeles, cada uno de los cuales tiene un color asociado). El conjunto de estos píxeles forman la imagen completa. Lo más habitual es que las imágenes contengan 3 bandas, correspondientes a las intensidades de los colores rojo, verde y azul, las cuales al combinarse permiten obtener el color de cada píxel.

Otro uso habitual del modelo raster es en los denominados Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), que recogen la topografía de un terreno.

De forma general, los valores de una capa ráster, en cualquiera de sus bandas, son casi exclusivamente numéricos, no estando los SIG preparados para manejar otro tipo de valores en la componente temática de una capa ráster. De esta forma, una capa raster puede equipararse al concepto matemático de una matriz, con las ventajas que ello supone para aplicar sobre ella herramientas matemáticas a la hora de su análisis.

Modelo vectorial

El otro modelo principal de representación es el modelo vectorial. En este modelo, no existen unidades fundamentales que dividen la zona recogida, sino que se recoge la variabilidad y características de esta mediante entidades, para cada una de las cuales dichas características son constantes. Las entidades se componen de primitivas geométricas, y estas pueden ser de tres tipos: puntos, líneas y polígonos (Figura 4.4).

Utilizando puntos, líneas o polígonos, puede modelizarse el espacio geográfico si se asocia a estas geometrías una serie de valores definitorios. Una entidad puede tener varias primitivas. Por ejemplo, en una capa de países, necesitaríamos varios conjuntos para representar España si queremos incluir tanto la peninsula como las islas que la forman. Todos estos polígonos constituyen una única entidad, ya que todos pertenecen al mismo país y tendrán el mismo conjunto de valores asociados.

A la hora de definir las formas geométricas básicas, todas ellas pueden en última instancia reducirse a puntos. Así, las líneas son un conjunto de puntos interconectados en un determinado orden, y los polígonos son líneas cerradas, también expresables por tanto como una serie de puntos. Todo elemento del espacio geográfico queda definido, pues, por una serie de

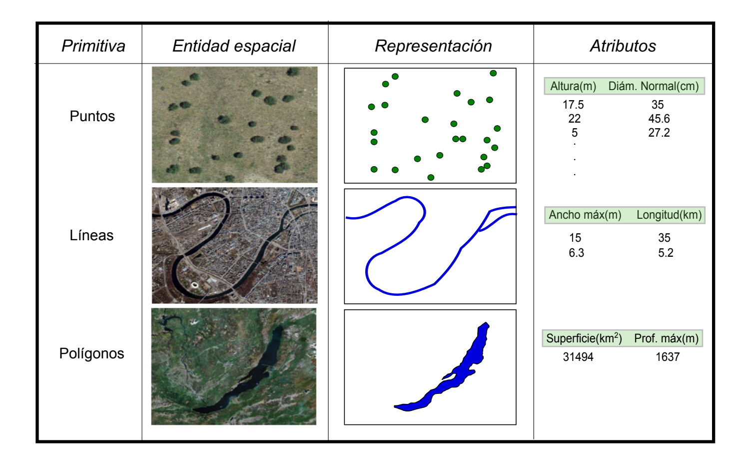


Figura 4.4: Primitivas geométricas en el modelo de representación vectorial y ejemplos particulares de cada una de ellas con atributos asociados

puntos que determinan sus propiedades espaciales y una serie de valores asociados.

Dentro de un SIG, una capa vectorial puede contener un único tipo de primitiva. Así, tenemos capas vectoriales de puntos, de líneas y de polígonos, respectivamente. Una variable puede recogerse con varios tipos de primitivas (por ejemplo, puede indicarse una ciudad con un punto o con un polígono que delimite su perímetro), y la elección de uno u otro tipo de geometría ha de ser función del tipo de fenómeno que se pretende modelizar o la precisión necesaria, entre otros factores.

La componente temática en el modelo vectorial se establece mediante los denominados atributos, que suelen ser múltiples, a diferencia de lo que sucede en el modelo raster, donde lo habitual es tener un único valor para cada celda. Los atributos de una capa vectorial pueden contener información de cualqueir clase, siendo más versátiles que en el caso de las capas ráster,

donde ya vimos que se maneja únicamente información numérica. Por su estructura particular (series de atributos asociados a una entidad), la componente temática en el modelo vectorial se presta especialmente a representarse en tablas y almacenarse en una base de datos, y puede analizarse independientemente de la componente espacial.

Un elemento particular del modelo de representación vectorial es la topología. Una capa vectorial contiene topología si en ella se almacenan de algún modo las relaciones espaciales que existen entre sus elementos. Disponer de topología en una capa vectorial es de gran importancia a la hora de llevar a cabo ciertos tipos de análisis, así como procedimientos tales como la edición de los propios datos geográficos.

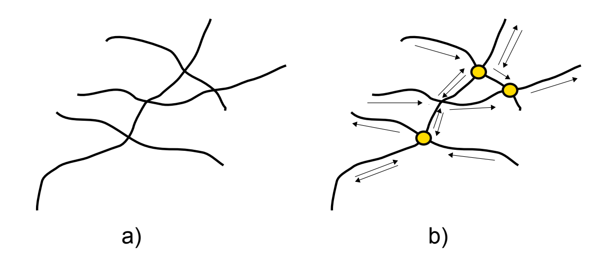


Figura 4.5: Capa de vías de comunicación sin topología (a) o con ella (b). Los puntos en este segundo caso indican conexiones entre vias, y son una representación visible de la topología existente.

Aunque la mayoría de operaciones con una capa vectorial pueden llevarse a cabo en ausencia de topología, algunas de ellas como el análisis de redes no se pueden llevar a cabo sin topología. Si pensamos en una capa de vías sobre la que desarrollar ese análisis de redes, un mero conjunto de elementos geométricos (líneas en este caso), no nos da información sobre los posibles enlaces entre las vías que quedan representadas. Los puntos donde se cruzan dos vías pueden ser cruces o rotondas (es decir, puede pasarse de una vía a otra, existiendo conexión entre ellas), o bien pasos elevados o subterráneos donde una de las vías pasa

por encima de la otra (y por tanto no existe comunicación entre ambas). Las circunstancias son muy distintas en función del tipo de cruce que exista, y por ello es imprescindible conocer esta información para efectuar un análisis de redes correcto (Figura 4.5)

El almacenamiento de entidades basado en una mera lista de coordenadas de cada entidad, sin topología, se conoce popularmente como *spaghetti*, pues si pensamos en una capa de lineas sin topología que se entrecruzan en el espacio, esta se asemejan en cierta forma a un caótico plato de *spaguettis* sin orden ni relación entre ellos.

Raster vs *vectorial*

Tanto el modelo raster como el vectorial pueden emplearse para recoger cualquier tipo de información. La figura 4.6 muestra un ejemplo de esto, representando una capa de vías según ambos modelos. Otro ejemplo para mostrar esto lo encontrarmos en las capas de elevaciones, que ya hemos visto que suelen recogerse en capas raster, en especial si se va a desarrollar sobre ellas algún tipo de análisis. No obstante, pueden recogerse también como una capa vectorial de puntos (este es una caso habitual si se obtienen los datos de un levantamiento topográfico), o bien como una capa de líneas que contenga curvas de nivel, entre otras opciones.

Resulta obvio que las diferencias entre los modelos ráster y vectorial son muy notables, y que cada uno de ellos posee sus propias ventajas e inconvenientes. Algunos aspectos a los cuales puede atenderse para comparar uno y otro modelo son los siguientes:

- Planteamiento. El modelo ráster hace más énfasis en aquella característica del espacio que analizamos (*qué* y *cómo*), mientras que el modelo vectorial da prioridad a la localización de dicha característica (*dónde*)

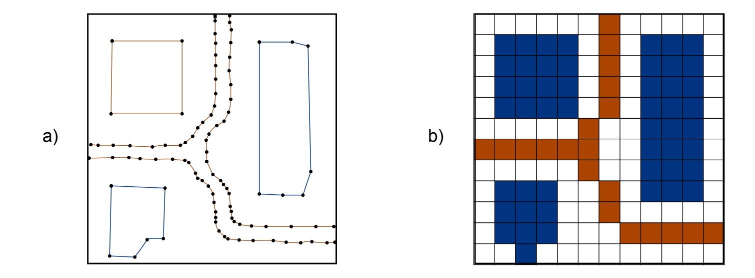


Figura 4.6: Comparación entre los esquemas del modelo de representación vectorial (a) y ráster (b).

- Precisión. El modelo ráster tiene su precisión limitada por el tamaño de celda. Las entidades menores que dicho tamaño de celda no pueden recogerse, y la variación espacial que sucede dentro del espacio de la celda tampoco.
  Asimismo, existe una imprecisión en las formas. El detalle con el que puede recogerse la forma de una entidad geográfica según el modelo vectorial es, en la práctica, ilimitado, mientras que, como puede verse en la imagen 4.7, el modelo ráster restringe las formas a ángulos rectos, ya que la unidad base es un cuadrado.

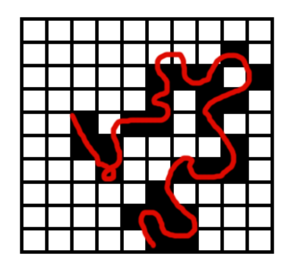


Figura 4.7: Imprecisión de forma en el modelo de representación ráster. La división del espacio en unidades cuadradas impide la representación fiel de entidades tales como curvas.

- Complejidad. La regularidad y sistematicidad de las mallas ráster hacen sencillo el implementar algoritmos de análisis, muy especialmente aquellos que implican el uso combinado de varias capas. Por el contrario, la irregularidad espacial de las capas vectoriales hace que la implementación de los mismos algoritmos sea sumamente más compleja si se trabaja con estas capas.

No existe un modelo de representación idóneo de forma global, sino que esta idoneidad depende de muchos factores, como por ejemplo:

- Tipo de variable o fenómeno a recoger. Las variables continuas tales como la elevación es más adecuado en general recogerlas en capas raster, para así facilitar su análisis, mientras que las variables discretas es preferible almacenarlas como capas vectoriales.
- Tipo de análisis o tarea a realizar sobre dicha variable. El uso que demos a una capa temática condiciona en gran medida el modelo de datos idóneo. Por ejemplo, en el caso de una capa de elevaciones, su análisis se lleva mejor a cabo si esta información está recogida según el modelo ráster. Sin embargo, si el objetivo principal es la visualización de esa elevación en conjunto con otras variables, unas curvas de nivel pueden resultar más adecuadas, ya que, entre otras cosas, no interfieren tanto con otros elementos a la hora de diseñar un mapa con todas esas variables.
- Contexto de trabajo. Por ejemplo, si queremos trabajar con imágenes, esto nos condiciona al empleo de datos ráster, ya que resulta mucho más sencillo combinarlos con las imágenes, las cuales siempre se presentan como capas ráster.

Existen procedimientos para convertir entre los formatos ráster y vectorial, de forma que el disponer de datos en un modelo de representación particular no implica que debamos desarrollar nuestro trabajo sobre dichos datos directamente, sino que podemos efectuar previamente una conversión.

Fuentes principales de datos espaciales

No hace tanto tiempo, toda la información que se manejaba dentro de un SIG tenía su origen en un mapa en papel, el cual debía *prepararse* para adaptarse a la naturaleza propia del SIG. El dato geográfico se obtenía a partir de la digitalización de cartografía, es decir, convertir los datos geográficos en formato impreso en datos en formato digital que un SIG pudiera manejar.

Un SIG implica una aplicación informática, y esta se alimenta en última instancia exclusivamente de datos digitales. Los datos geográficos digitales tienen una serie de ventajas frente a los analógicos (además del mero hecho de que podemos incorporarlos a nuestro SIG), y suponen, como sucede en muchos otros campos, un salto cualitativo importante. Entre estas ventajas, que son a su vez comunes a otros ámbitos, destacan la sencillez de actualización, la facilidad de distribución (en especial con la aparición de Internet), el menor espacio físico necesario para su almacenamiento, la facilidad y precisión del análisis, y la facilidad de mantenimiento (el dato digital no se degrada, lo que se degrada es su soporte, pero es sencillo replicar el dato sin pérdida de calidad)

Hoy en día las técnicas de adquisición de datos han evolucionado y permiten crear datos que pueden ser directamente integrados en un SIG. Distinguimos así fuentes de datos primarias y secundarias.

Las fuentes de datos primarias son aquellas cuyos datos podemos emplear en un SIG, ya que estos, en su forma original, ya son susceptibles de ser sometidos a las operaciones de manejo y análisis que incorporan los SIG. Por su parte, las fuentes de datos secundarias generan datos que no pueden emplearse en un SIG sin un proceso de adaptación previo, siendo el dato derivado el que utilizamos en un SIG, no el original.

En este capítulo, veremos las distintas fuentes de datos con las que podemos trabajar un en SIG.

Teledetección

La primera fuente de datos que trataremos en este capítulo es la teledetección. Entendemos por teledetección el estudio y medida de las características de un objeto sin que exista contacto físico. Para ello, se miden las perturbaciones que el objeto provoca en su entorno, principalmente las de tipo electromagnético. En nuestro caso, se aplica a elementos de la superficie terrestre.

Un sistema de teledetección cuenta con los siguientes elementos (Figura 5.1):

- Una fuente de radiación (A). Puede ser de origen natural o artificial. La radiación emitida por dicha fuente llega al terreno y sufre una perturbación causada por los elementos de este, siendo esta perturbación el objeto de estudio de la teledetección. Los propios objetos pueden ser también emisores ellos mismos de radiación.
- Unos objetos (B) que interaccionan con la radiación o la emiten, según lo anterior.
- Una atmósfera (C) por la que se desplaza la radiación, tanto desde la fuente hasta el objeto como desde el objeto hasta el

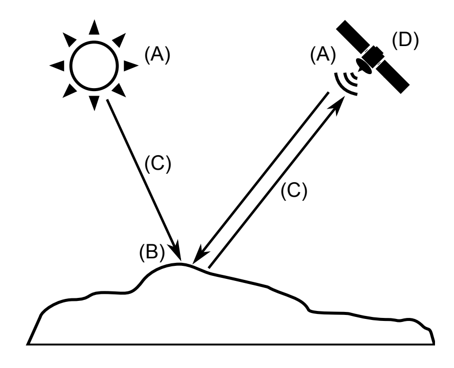


Figura 5.1: Esquema de un sistema de teledetección.

receptor. La atmósfera también interactúa con la radiación, introduciendo igualmente perturbaciones en ella.

- Un receptor (D) que recoge la radiación una vez esta ha sido perturbada o emitida por los objetos. El receptor va a generar como producto final una imagen (en términos de un SIG, una capa ráster), en cuyas celdas o píxeles se va a contener un valor que indica la intensidad de la radiación. Estos valores son valores enteros que indican el nivel de dicha radiación dentro de una escala definida (habitualmente valores entre 1 y 256), y se conocen dentro del ámbito de la teledetección como Niveles Digitales.

A lo largo de este apartado veremos con detalle estos elementos. Para estudiar los dos primeros, estudiaremos los fundamentos físicos relativos a la radiación y a la la interacción entre esta y la materia, mientras que para el estudio del sistema receptor analizaremos los elementos de este en dos componentes por separado: sensores y plataformas.

La interacción de la atmósfera interesa de cara a eliminar su efecto, ya que lo que resulta de interés en general son los objetos en la superficie terrestre, no la atmósfera como tal. Eliminar esta influencia de la atmósfera es parte de los procesos posteriores

que se realizan con la imagen, aunque, por su complejidad, no los detallaremos aquí.

Fundamentos físicos

La radiación electromagnética es producto de las alteraciones en los campos eléctrico y magnético, las cuales generan ondas correspondientes a cada uno de los campos magnético y eléctrico. Estas ondas se desplazan a la velocidad de la luz, y se pueden describir con los parámetros habituales, tales como la longitud de onda o la frecuencia. El rango de longitudes de onda cubierta por la radiación electromagnética se conoce como espectro electromagnético.

El espectro se subdivide en regiones en función de su longitud de onda, tales como (de menor a mayor longitud de onda) los rayos gamma, los rayos X, la región ultravioleta, la región visible, la región infraroja, o las microondas

La radiación emitida por una fuente de radiación es alterada por la presencia de los distintos objetos, ya que estos absorben, transmiten o reflejan esta.

Estos tres fenómenos se dan en diferente proporción en función de las características del objeto y de la radiación. A efectos de la teledetección, la parte que interesa es aquella que se refleja en el objeto, ya que esta es la que posteriormente puede recogerse y emplearse para la generación de las imágenes.

Como ya se dijo en el capítulo acerca de los datos, las imágenes como capas ráster presentan habitualmente la particularidad de tener varias bandas. En lugar de un único valor para cada celda, existen n valores, uno por cada banda. La imagen recoge la intensidad de la radiación dentro de una amplitud dada del espectro, y a su vez subdivide esta en distintas franjas. Los Niveles Digitales de cada banda corresponden a la intensidad dentro de una de esas franjas del espectro en particular.

Puesto que cada objeto refleja la radiación de diferentes longitudes de onda de modo distinto, esto puede considerarse como una propiedad del objeto. Se tiene así el concepto de firma espectral, que es la respuesta característica de un tipo de objeto dentro del espectro electromagnético.

Sensores y plataformas

En un sistema de teledetección, dos son los elementos tecnológicos principales que lo definen: el sensor y la plataforma.

El sensor es el elemento que incorpora la capacidad de «leer» la radiación electromagnética y registrar su intensidad dentro de la una zona concreta del espectro. Puede ir desde una simple cámara fotográfica hasta un sensor más especializado.

Los sensores se denominan pasivos si aprovechan las fuentes de radiación existentes en la naturaleza (fundamentalmente el Sol) y se limitan a recoger la radiación de dichas fuentes reflejada por los elementos del medio, o activos si emiten radiación, y recogen dicha radiación tras ser reflejada por dichos elementos. Para entender este concepto de un modo sencillo, podemos decir que una cámara fotográfica es un sensor pasivo, mientras que una camara fotográfica con *flash* es un sensor activo. La radiación emitida por los sensores activos no ha de ser necesariamente luz visible (como en el caso del flash), sino que pueden emitir en otras secciones del espectro.

Tecnologías como el radar o el LiDAR (similar al radar pero con pulsos de laser en lugar de ondas de radio), se basan en sensores activos. En el caso del LiDAR, permite obtener imagenes que no tiene un caracter visual, sino que contienen en sus valores la elevación de los objetos, pudiendo así emplearse para cartografiar el relieve.

La plataforma, por su parte, es el medio en el que se sitúa el sensor y desde el cual se realiza la observación. A bordo de una plataforma pueden montarse varios sensores.

Los dos tipos principales de plataformas son aquellas situadas dentro de la atmósfera terrestre (aviones en su mayoría) y aquellas situadas fuera de la atmósfera (a bordo de satélites).

Los aviones tienen la ventaja de su disponibilidad, ya que pueden pilotarse y de este modo permiten cubrir cualquier lugar de la tierra en cualquier momento.

A diferencia de un avión, un satélite no puede dirigirse a voluntad (no puede pilotarse), y su movimiento es una característica inherente que viene definida por una serie de parámetros. Estos parámetros se conocen como parámetros orbitales pues definen la órbita descrita por el satélite en torno a la Tierra.

Las órbitas pueden clasificarse en función de su eje de rotación así como en función de su movimientos. Dos casos partículares de órbitas son las geosíncronas (el satélite se sitúa sobre un punto fijo de la Tierra y su movimiento sigue al de rotación de esta) y las heliosíncronas (el satélite pasa por cualquier punto siempre de las superficie terrestre siempre a la misma hora solar).

Resoluciones

Uno de los parámetros principales que definen las propiedades de un sistema de teledetección son las *resoluciones*. Estas establecen el nivel de detalle de los productos que el sistema genera, determinando este en las distintas magnitudes en las que el sistema opera. Las resoluciones dependen del sensor y de la plataforma como binomio operativo, y de las características propias de ambos. Distinguimos cuatro resoluciones, a saber:

- Resolución espacial. Indica la dimensión del objeto más pequeño que puede distinguirse en la imagen. Es la dimensión real que un píxel de la imagen tiene sobre el terreno.
- Resolución espectral. Indica la amplitud de cada una de las regiones del espectro que se recogen en la imagen. La región del espectro abarcada y el número de bandas son los elementos que definen la resolución espectral.

- Resolución radiométrica. Para cada una de las bandas que produce un sensor (asociada esta a una determinada región del espectro según su resolución espectral), el dato recogido, que constituye su Nivel Digital, indica la intensidad correspondiente a esa región. El nivel de detalle con el que puede medirse esa intensidad es el que define la resolución radiométrica del sensor.
- Resolución temporal. Indica el tiempo que tarda el sensor en volver a tomar una imagen de una misma zona. Tiene sentido en el caso de sensores orbitales. La resolución temporal depende de la altura a la que se encuentra la plataforma que monta el sensor, así como la resolución espacial.

No resulta posible (por razones técnicas y teóricas) disponer de un sensor en el cual todas las anteriores regiones sean altas. Algunos sensores priman determinadas resoluciones, mientras que otros favorecen otras distintas.

A la hora de utilizar imágenes de teledetección, debe considerarse qué tipo de resolución resulta de mayor interés (por ejemplo, para localizar elementos de pequeño tamaño son necesarias imágenes con alta resolución espacial). En base a esto, se escogerá una u otra clase de imágenes, que será la que ofrezca los valores de resolución más adecuados en conjunto. La utilización simultánea de datos de varios sensores en un proyecto es una alternativa para compensar este hecho.

Fotogrametría

Relacionada con la teledetección, encontramos la fotogrametría. La fotogrametría es la técnica para estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando medidas realizadas sobre una o varias fotografías. En el campo del SIG, es de especial interés la fotogrametría aérea, cuya base de trabajo tradicional son las

fotografías aéreas, y que sirve principalmente para la creación de cartografía de elevaciones a partir de un proceso de restitución.

En lugar de imágenes individuales, la fotogrametría emplea pares de imágenes, cada una de ellas tomada desde un punto distinto. Mediate estereoscopía, resulta posible recrear el efecto que ambas imágenes tendrían para la reconstrucción tridimensional de la escena, y «engañar» al cerebro del observador para que este pueda observar la escena con volumen y profundidad. Esto permite posteriormente conocer las formas del terreno, y a partir de ello crear las capas correspondientes, con informacion de elevaciones.

Cuando se emplean imágenes de satélite, los pares se pueden obtener con aquellas plataformas y sensores que permiten variar el ángulo de visión, de modo que en la misma pasada del satélite se toman imágenes de una zona desde distintos puntos.

Según su enfoque, la fotogrametría puede ser analógica, analítica o digital, siendo esta última la que se basa en el trabajo con imágenes digitales dentro de un entorno computerizado, y la que mayor relación tiene con los SIG.

La fotogrametría requiere de una estación fotogramétrica, que en el caso digital incorpora muchos elementos propios de un SIG, así como otros específicos del trabajo fotogramétrico. Entre estos, caben destacar aquellos que permiten la generación de visualizaciones con sensación de profundidad, así como los periféricos específicos tales como ratones 3D o manivelas similares a las que presentan los restituidores analíticos, facilitando así la adaptación de los operarios a este tipo de estación.

Cartografía impresa. Digitalización

Existe gran cantidad de cartografía en formato no digital, tales como mapas impresos o fotografías aéreas antiguas en formato analógico.

La digitalización de esta cartografía, necesaria para su uso en un SIG, supone la creacion de capas raster o vectoriales a partir de ella. En este último caso, implica la disgregación de la información que contiene, ya que en un mapa clasico se presentan distintas informaciones que en el uso común de un SIG se almacenan en capas independientes.

La digitalización implica tres etapas: el registro o georeferenciación(Establecimiento del marco geográfico —sistema de coordenadas, puntos de control, etc—, de forma que los elementos digitalizados posteriormente sean correctos), la digitalización de la compoente espacial (creación de geometrías en el caso de capas vectoriales), y la digitalización de la componente temática (creación de valores de celda en el caso de capas raster o de atributos en el caso vectorial).

La digitalización puede ser manual o automática. En el primer caso, es un operario quien introduce los valores de los elementos digitalizados, mientras que en el segundo caso es un procedimiento automatizado el que se encarga de ello.

Para la creación de capas raster, lo habitual es la digitalización automática, a partir del escaneo del documento original.

El escaneo es el proceso de digitalización que convierte una imagen impresa (analógica) en una imagen digital. Dentro de un SIG, se emplea para digitalizar tanto mapas como fotografías aéreas, y su resultado es una capa ráster.

Aunque existen escáneres específicamente diseñados para el trabajo con documentos cartográficos, estos son dispositivos muy especializados y de muy elevado coste. Los escáneres más genéricos, pensados para el trabajo con todo tipo de imágenes y para todo tipo de usos, pueden, no obstante, emplearse de igual modo para escanear tanto mapas como imágenes aéreas con resultados aceptables, utilizándose con frecuencia.

Los parámetros básicos que definen las características de un escáner son la resolución espacial y la resolución radiométrica.

La primera de estas se mide habitualmente en puntos por pulgada y nos indica el número de puntos (celdas) que el sensor es capaz de tomar por cada unidad de longitud sobre el papel. La resolución radiométrica, por su parte, indica la capacidad del sensor para distinguir entre dos colores distintos.

En relación con las resoluciones de escaneo, no deben olvidarse los fundamentos cartográficos que se explicaron en un capítulo anterior. Trabajando con una resolución más elevada no hace necesariamente que estemos incorporando más información, ya que esta puede no existir en el documento original. Tendríamos un volumen de datos más elevado que el necesario para recoger toda la información del mapa.

En el caso de capas vectoriales, es más habitual la digitalización manual. En ella, un operario va definiendo las entidades, trazando las forma de estas o, en caso de ser una entidad de tipo punto, indicando su localización.

Para llevar a cabo ese trazado de la entidad, se necesita emplear algún equipo que recoja la información introducida por el operador. Existen dos alternativas principales: utilizar una tableta digitalizadora diseñada específicamente para la digitalización, o bien digitalizar utilizando las funciones de edición de un SIG, realizando todo el proceso dentro de este y sin más herramientas que el propio ordenador y un dispositivo señalador como el ratón. En este segundo caso, la digitalización se produce sobre la pantalla, por lo que es necesario tener ya una versión digital del documento (aunque no en forma de capa vectorial), la cual puede obtenerse mediante escaneo.

La digitalización automática de entidades para formar una capa vectorial, conocida como vectorización, resulta también posible, aunque presenta más dificultades. El principal problema reside en la necesidad de una adecuada preparación del documento a digitalizar, ya que las condiciones de este afectan notablemente a la calidad del resultado. La vectorización, al igual que la digitalización manual, puede llevarse a cabo mediante

dispositivos especializados, o bien mediante el software apropiado, el cual se ejecuta en un ordenador y trabaja con una imagen escaneada del documento original.

Un caso particular de digitalización es la creación de capas a partir de valores o coordenadas. Es decir, cuando no existe un mapa o documento cartográfico, sino simplemente una serie de datos espaciales expresados de forma alfanumérica que son susceptibles de convertirse en una capa y emplearse así dentro de un SIG. Este proceso se conoce como geocodificación e implica la asignación de coordenadas a puntos de interés tales como muestreos de campo levantamientos topográficos, inventarios de lugares donde tiene lugar un determinado fenómeno o existe un determinado elemento, u otros como el *geotagging* de fotografías, para asociar a estas la posición del enclave en el que se han tomado.

En el caso de encontrarse en formato analógico, estos datos pueden digitalizarse mediante la simple introducción manual de coordenadas a través del teclado o bien mediante algún sistema más específico como el escaneo del documento y el empleo de algún software de reconocimiento de caracteres (OCR).

En el caso de encontrarse ya en formato digital, estos datos pueden presentarse como tablas en una hoja de cálculo, datos asociados a otro dato de cualquier tipo (como en el caso del *geotagging*) o incluso simples archivo de texto. Muchos SIG incorporan métodos para leer estos archivos y después utilizar las coordenadas que contienen con el fin de crear una nueva capa, en general de puntos.

Calidad de la digitalización

Uno de los aspectos más importantes del proceso de digitalización es la calidad del resultado obtenido, que debe tratar de ser lo más cercano posible a la calidad original de la información

que se digitaliza, es decir, del mapa o imagen original. Independientemente de la precisión del equipo utilizado o la habilidad y experiencia del operario, la digitalización no es por completo perfecta, conteniendo siempre ciertas deficiencias y errores.

Además de los errores que puedan incorporarse en las distintas fases del proceso de digitalización (sea este del tipo que sea), hay que considerar que las fuentes originales a digitalizar también pueden incluir los suyos propios. Así, el proceso de escaneado puede incorporar distorsiones geométricas, pero es posible que el mapa o fotografía aérea de partida también presente alguna distorsión como consecuencia de su deterioro, más patente cuanto más antigua sea esta.

La información contenida en el documento cartográfico puede también contener elementos problemáticos de cara a obtener un producto de calidad, que pueden ir desde líneas borradas total o parcialmente a manchas en el propio mapa derivadas de su uso habitual.

Dentro de los errores que aparecen como consecuencia de la digitalización en sí, un tipo importante de ellos son las discrepancias y coincidencias imperfectas entre las distintas entidades, tal como las que se muestran en la figura 5.2

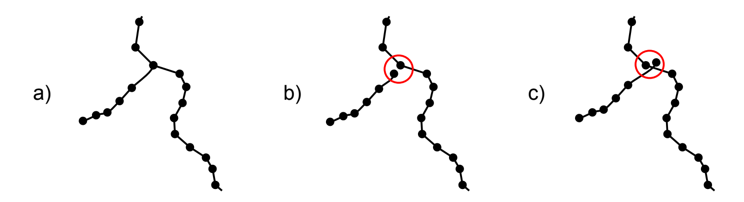


Figura 5.2: Errores derivados del proceso de digitalización. a) Versión correcta, con nodos coincidentes. b) y c) Versiones con errores que causan una falsa desconexión entre las líneas.

Debido a esto, las capacidades de edición de los SIG incorporan funcionalidades que permiten evitar estos errores en el momento de la digitalización, ayudando al operario en su tarea

y permitiéndole alcanzar una exactitud y precisión imposible de lograr sin estas funcionalidades. Entre ellas, es especialmente importante el establecimiento de tolerancias y ajuste automático en función de ellas (esto se conoce con el término ingles snapping), que ayudan a garantizar la coincidencia entre los distintos vértices.

El hecho de que exista una completa coincidencia es especialmente importante cuando la capa vectorial que se digitaliza contiene información topológica. La topología exige que la coincidencia sea correcta y defina perfectamente la relación entre las entidades. La digitalización de entidades, en caso de querer recoger su topología, debe realizarse siguiendo reglas adicionales tales como la digitalización una única vez de los lados comunes de polígonos. Debe, asimismo, recoger información adicional, como por ejemplo la necesaria para la definición de nodos en los cruces entre líneas cuando existe relación entre estas.

GPS

Uno de los hitos en la aparición de nuevas fuentes de datos geográficos es la aparición de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite. Se trata de sistemas que permiten conocer en todo momento y en cualquier punto del globo la localización exacta de dicho punto con un margen de error del orden de unos pocos metros o menos. Para ello, se basan en el envío de señales entre un dispositivo situado en el punto concreto y una red de satélites, pudiendo establecerse la posición exacta mediante las características de dicha transmisión.

El ejemplo más extendido de estos sistemas es el Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System, o GPS). El GPS cuenta con una constelacion de 24 satélites activos, así como estaciones terrestres que los controlan, y su funcionamiento se basa en la triangulación de la posición de una unidad receptora, mediante las señales procedentes de un cierto número de

satélites. Esta triangulación se basa en distancias entre la unidad receptora y dichos satelites, las cuales se calculan mediante diversos mecanismos. La posición se calcula no únicamente en sus coordenadas *x* e *y*, sino también en *z*, es decir en elevación. El sistema GPS emplea como sistema geodésico de referencia el WGS84.

El diseño de la red de satélites está pensado para garantizar que en cualquier punto de la superficie terrestre y en cualquier momento, un receptor puede localizar el número necesario de satélites para obtener con exactitud su precisión.

Existen numerosas fuentes de error que causa desviaciones apreciables en el calculo de coordenadas mediante GPS. Entre ellas destacan los errores en la posición de los satélites, errores por el rebote de la señal en otros con anterioridad a alcanzar el receptor, errores por el paso de la señal por la atmósfera, así como los de precisión de los relojes empleados para el cálculo de distancias. La disponibilidad selectiva era un error aleatorio introducido en la señal GPS con fines militares, pero fue eliminada en el año 2000.

Entre las técnicas empleadas para corregir estas desviaciones, destaca el denominado GPS diferencial, pensado en origen para eliminar el error de la disponibilidad selectiva, aunque también eficaz para corregir una buena parte los restantes errores citados anteriormente.

Para la aplicación del GPS diferencial se requiere no solo un receptor único (aquel del cual se quiere calcular su posición), sino también otro receptor fijo de referencia cuyas coordenadas se conocen con alta precisión. Este receptor fijo es, a su vez, un receptor de alta precisión y, además de calcular su propia posición, emite información que las unidades receptoras pueden aprovechar para corregir sus mediciones. El receptor móvil, lógicamente, tiene que estar capacitado para este tipo de correcciones, para así poder hacer uso de la señal de la estación de referencia.

El fundamento de esta técnica es que los errores que afectan al receptor móvil también afectan al de referencia. No obstante, la magnitud del error que afecta al receptor de referencia puede conocerse, ya que se conoce la coordenada exacta de este, y en base a eso puede eliminarse el error que afecta al receptor móvil, asumiendo que ambos errores son de similar índole.

En la actualidad, aplicando estas técnicas de corrección diferencial, un GPS puede obtener precisiones del orden de 2 metros en latitud y longitud, y 3 en altitud. Sin corrección diferencial, esta precisión es de unos 10–20 metros.

La precisión del sistema GPS depende del tipo de receptor GPS (o, en el lenguaje común, GPS a secas) que se emplee, obteniéndose mayores precisiones con receptores más avanzados, siempre dentro de las posibilidades del propio sistema GPS. Existen muchas clases de receptores GPS, siendo dos de ellas las principales en relación con los SIG:

- GPS para uso general. Unidades pequeñas y portátiles, de bajo coste, para actividades al aire libre, donde no se requiere una precisión elevada sino simplemente un conocimiento de la posición aproximada. Se emplean, por ejemplo, para recoger rutas en senderismo o navegación.
- GPS para la medición topográfica. Unidades de medio tamaño, generalmente con una antena independiente que se conecta a la unidad y que el propio operario carga a la espalda. La antena garantiza mayor precisión y una mejor localización de satélites en condiciones tales como zonas bajo arbolado. Están pensados para un uso profesional en levantamientos o replanteos, ofreciendo buena precisión en todas las coordenadas.

La capacidad principal de una unidad GPS en relación con un SIG es la de recoger coordenadas. Esta funcionalidad permite almacenar puntos o trazados completos, encontrándose el operario inmóvil o bien en movimiento a lo largo de dicho trazado.

Es habitual utilizar los vocablos ingleses de la terminología GPS para denotar los distintos elementos que pueden recogerse, conociéndose a un punto de interés aislado como waypoint y un trazado como track. Una serie ordenada de *waypoints* se conoce como route (ruta).

En el trabajo con el receptor GPS, el operario se puede detener en un punto cualquiera y memorizar las coordenadas del mismo, añadiendo así un *waypoint* a la lista de los ya almacenados. Para crear un trazado, se suele disponer de funcionalidades de recogida automática de puntos, de tal modo que el receptor memoriza estos a intervalos fijos de tiempo. El operario simplemente ha de desplazarse por el trazado y dejar que el receptor haga su trabajo mientras tanto.

Información Geográfica Voluntaria

Hemos mencionado ya que los dispositivos tales como receptores GPS de bajo coste pueden emplearse para recoger información geográfica y crear datos geográficos, y que cuando esto se une a los conceptos participativos de la denominada Web 2.0, surgen iniciativas de gran interés en las que el usuario de a pie, sin necesidad de una formación específica como cartógrafo, puede aportar sus datos para que otros los exploten posteriormente. Aunque no se trata de una fuente de datos como tal, y los elementos y dispositivos empleados ya los hemos visto a lo largo de este capítulo, el cambio que supone la inclusión de una filosofía acorde con las ideas de la Web 2.0 es tan notable que merece ser tratado por separado. No se trata de un cambio en la propia toma o preparación de datos, o de una tecnología nueva que se aplique a estos, sino de un cambio social y filosófico que redefine el propio concepto de la información geográfica en lo que a la creación del dato geográfico respecta, y cuyas consecuencias son ciertamente importantes, ya que abren el ámbito de la creación cartográfica a un nuevo y amplio grupo de personas.

Se conoce como *Información Geográfica Voluntaria o Participativa* (en inglés, Volunteered Geographical Information, VGI) al uso de Internet para crear, gestionar y difundir información geográfica aportada voluntariamente por usuarios de la propia red. El conjunto de herramientas y técnicas que emplean esos usuarios para aportar su información conforma lo que se ha dado en llamar neogeografía. La comparación entre proyectos de creación de VGI y la bien conocida Wikipedia sirve perfectamente para ilustrar qué es lo que entendemos por VGI y neogeografía, ya que la VGI es el resultado de aplicar los conceptos de la Web 2.0 al ámbito de la información geográfica.

En el caso particular de esta última, la neogeografía ha supuesto un profundo cambio en algunas de las ideas básicas de la cartografía, modificando asimismo la concepción tradicional de la información geográfica, sus características o el papel que esta venía desempeñando en muchos ámbitos (o incluso dándole un papel en campos donde con anterioridad el uso de información geográfica era escaso). Algunas de las ideas principales sobre la neogeografía son las siguientes:

- Popularización y democratización. La producción cartográfica ha estado siempre en manos de gobiernos u organismos, y en muchas ocasiones fuertemente censurada debido a su elevado valor estratégico. Con la VGI, la creación de información geográfica se democratiza y se convierte en un proceso participativo libre y sin restricciones. Se invierte el esquema «hacia abajo» de producción y uso de información geográfica.
- Los ciudadanos se convierten en sensores y tienen mayor consciencia de su realidad geo–espacial.
- Se elimina parte del «misticismo» de la producción de información geográfica

En la actualidad, el proyecto de VGI de mayor relevancia es OpenStreetMap (OSM), un «proyecto colaborativo para crear mapas libres y editables».

Con independencia de la forma en que se hayan obtenido, los datos pueden requerir otros datos adicionales para interpretarse. Por ejemplo, si tenemos las coordenadas de un punto, para interpretarlo correctamente necesitamos conocer, entre otras cosas, el sistema de coordenadas en que vienen expresadas esas coordenadas. El dato con el que trabajamos (las coordenadas), requiere unos datos adicionales (por ejemplo, el código EPSG del sistema de referencia empleado) para cobrar verdadero sentido.

Surge así el concepto de metadatos. Los metadatos son datos acerca de los datos, y su misión es explicar el significado de los datos. Es decir, ayudan a los usuarios de los datos a entender mejor el significado que estos tienen y la información que guardan. Los metadatos son un documento adicional que acompaña a los datos, y que permite una mejor gestión y una utilización más precisa de ellos.

Trabajando en el entorno de un SIG, los metadatos se asocian a una capa y a su contenido, y pueden referirse a ambas componentes (temática y espacial)

El concepto de metadato no es algo nuevo y exclusivo de los datos digitales, ya que un mapa impreso también contiene metadatos en cierta forma. Una leyenda o un texto en un margen del mapa con información sobre la fecha en que se ha creado son también metadatos. En el caso de los datos geográficos digitales, los metadatos no forman parte del dato directamente sino que son independientes de este. Ello permitirá realizar operaciones separadamente con los metadatos, tales como búsquedas, que abren nuevas posibilidades y dan un gran valor a estos.

Dos de las funciones principales de los metadatos son garantizar el uso correcto de los datos y facilitar su gestión, localización y consulta.

Los datos espaciales, como muchos otros datos, son creados habitualmente para un determinado objetivo, y este objetivo no

ha de ser necesariamente evidente o contenerse como tal en los datos mismos. Cuando se emplean esos datos para un objetivo distinto a aquel para el que fueron diseñados, pueden surgir problemas debido a que se está realizando un proceso para el que los datos con los que se trabaja presentan carencias. Por ejemplo, consultar los metadatos puede evitar el trabajo con datos desfasados o de precisión insuficiente, ya que conociendo estos parámetros es posible juzgar si los datos son adecuados al fin que se persigue con ellos.

Los creadores de datos deben procurar acompañarlos de metadatos precisos y suficientes, y los usuarios deben consultarlos antes de utilizar dichos datos.

Respecto a la gestion de los datos, los metadatos facilitan la organización y la realización de tareas tales como la busqueda de datos dentro de una colección de estos. Los metadatos constituyen un «resumen» de las características principales de los datos, y pueden ser empleados para labores de búsqueda y localización de datos de un tipo dado. Los metadatos facilitan y agilizan la localización de los datos cuando estos se buscan por criterios geográficos. Añadiendo a los metadatos elementos como la extensión del área cubierta por los datos, este tipo de búsquedas se efectúan de forma más ágil y efectiva. En este sentido, el uso de metadatos es fundamental para el establecimiento de catalogos de datos, los cuales ya que responden a las peticiones del usuario del catálogo en función de la información que los metadatos contienen.

Contenido y creación de metadatos

La información que contienen los metadatos para una capa de datos espaciales depende de factores tales como el modelo de representación empleado, el formato en que se almacenan los datos (formato de archivo, base de datos, etc.), la organización,

entidad o individuo responsable o el elemento al que se asocian (conjunto de capas, capa individual, entidad...).

Algunos de los elementos comunes que se incorporan a los metadatos geográficos son la información de identificación (para identificarlo de forma única y distinguirlo de otros), la información sobre la calidad de los datos (incluyendo su origen y el de los datos de los que deriva, apareciendo asi el concepto de linaje de los datos), la información sobre la componente no espacial o la información sobre la distribución (acceso, licencias, etc.)

Los metadatos puede crearse en el origen mismo de los datos, recogiendo la información al mismo tiempo que se producen los datos en sí. Tambien pueden extenderse posteriormente por parte de distribuidores, organizadores o usuarios.

La creación de los metadatos se realiza en su mayor parte de forma manual, existiendo aplicaciones específicas para ello. Los metadatos que pueden extraerse de las capas de datos directamente, tales como la extension cubierta por estos, pueden crearse de forma automática.

Los metadatos se almacenan en general como ficheros adicionales a los ficheros de datos, o bien como parte de una base de datos.

Software y tecnología

El concepto clásico de un SIG es el de una aplicación completa en la cual se implementan herramientas para llevar a cabo las tareas básicas del trabajo con datos geográficos: creación o edición, manejo y análisis. Junto a este enfoque tradicional, con el tiempo han surgido otras formas distintas de aplicaciones que también pueden considerar como parte del ámbito del SIG.

Veremos en este capítulo las características de las aplicaciones SIG, divididas en tres grupos fundamentales: herramientas de escritorio, cartografía en la Web (*Web–mapping*) y SIG móvil. Asimismo, veremos algunos aspectos tecnológicos relacionados con ellas.

Herramientas de escritorio

Podemos dividir las funciones básicas de un SIG de escritorio en cinco bloques: entrada y salida de datos, visualización, edición, análisis y generación de cartografía. Una aplicación de escritorio habitual presenta todas estas capacidades en cierta medida, aunque no necesariamente con el mismo nivel de implementación.

Entrada y salida de datos

Una aplicación SIG de escritorio debe implementar capacidades para leer datos y, opcionalmente, para guardarlos. Esta ultima es necesaria en el caso en que el SIG pueda generar nuevos datos geográficos (nuevas capas), pero no en aquellas aplicaciones sin capacidades de análisis o edición, donde su empleo no ha de crear nuevos datos.

La existencia de librerías y componentes de acceso a datos en los que las aplicaciones SIG de escritorio pueden apoyarse permite dar soporte al gran número de formatos de datos existentes, mejorando la conectividad entre estas.

Además de acceder a ficheros de datos, en la actualidad es importante poder acceder a bases de datos o servicios remotos. Hablaremos de estos últimos más adelante dentro de este capítulo.

Visualización

La visualización es una función fundamental dentro de los SIG y del trabajo con cartografía en general. Tiene importancia cuando la representación de los datos es el propósito principal de utilizar un SIG, pero también cuando el trabajo está enfocado a la edición o la realización de análisis, ya que la visualización y exploración visual de los datos de partida es un paso previo.

La visualización de datos geográficos en un SIG se compone fundamentalmente de un lienzo sobre el que se sitúan las distintas capas, y que el usuario va conformando añadiendo nuevas capas y editando su simbología, es decir, la forma en la que estas se representan. Las capas se sitúan en un orden dado dentro del lienzo, lo que permite establecer una jerarquía de representación y así lograr el aspecto deseado.

Junto a este lienzo existen herramientas de navegación que permiten ampliar o reducir la escala, o bien modificar el encuadre (Figura 6.1).

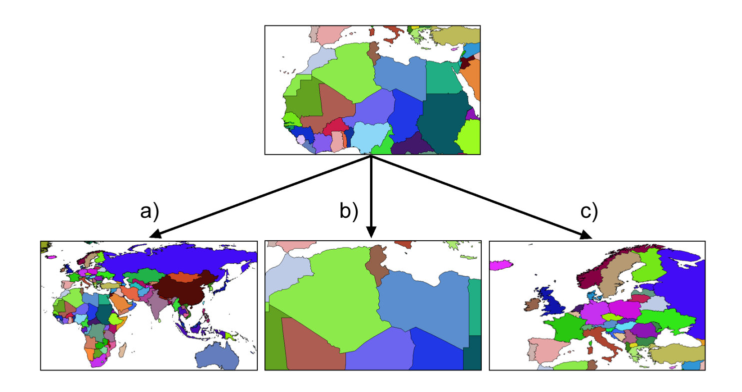


Figura 6.1: Herramientas de navegación fundamentales en el entorno gráfico de un SIG de escritorio. a) alejamiento (*zoom out*), b) acercamiento (*zoom in*), c) desplazamiento (*pan*)

El aspecto más destacable de la visualización de datos espaciales en un SIG es que, a diferencia de un mapa clásico donde no pueden modificarse sus características, el usuario puede aquí de forma rápida y sencilla elegir *qué* ve y *cómo* lo ve. El dato espacial digital es independiente de la información necesaria para su representación (colores, texturas, etc.), y un mismo dato puede por tanto representarse de maneras diferentes. Esto es particularmente cierto para el caso de capas vectoriales, así como para capas ráster que contengan un valor de tipo no gráfico, es decir, aquellas que no sean imágenes.

Aunque en el caso más habitual la representación de una capa en un lienzo de un SIG es bidimensional, existen también SIG con capacidades de visualización tridimensional. En este caso, las herramientas de navegación son más complejas, existiendo ajustes relativos a la perspectiva, a los ángulos de visión o a la exageración del relieve, entre otros parámetros.

El análisis es una capacidad fundamental de los SIG desde sus orígenes. Otros usos, tales como la visualización, pese a ser prácticamente imprescindibles hoy en día, estaban muy limitados en los primeros SIG.

La tendencia actual en los SIG es considerar las capacidades de análisis como herramientas modulares que se ejecutan sobre una plataforma base, la cual comprende las capacidades de visualización y entrada y salida de datos. Todas estas capacidades de análisis son independientes entre sí, aunque pueden coordinarse y emplearse en conjunto para alcanzar un resultado concreto.

Cuando las herramientas de análisis utilizan directamente la base del SIG donde se encuentran las capacidades de visualización y manejo de datos, puede existir cierto grado de interactividad. Por ejemplo, el usuario puede delimitar un área o introducir una coordenada operando sobre el lienzo donde se representan las capas, y este valor se utilizará después como parámetro de entrada para una operación analítica.

En caso de no existir este tipo de interacción entre elementos de análisis y elementos de visualización y exploración de datos, los procesos de análisis suelen constituir utilidades autocontenidas que simplemente toman una serie de datos de entrada, realizan un proceso en el que el usuario no interviene, y finalmente generan un resultado con carácter definitivo. Este resultado podrá ser posteriormente visualizado o utilizado como entrada para un nuevo análisis.

Por su naturaleza, tanto los datos espaciales como los procesos en los que estos intervienen se prestan a formar parte de flujos de trabajo más o menos complejos, y es por ello que en los SIG actuales una funcionalidad básica dentro del análisis es la automatización. Esta se da mediante la creación de tareas complejas que permiten simplificar todo un proceso de muchas

etapas en una única que las engloba a todas. La forma anteriormente comentada en que aparecen las formulaciones dentro de un SIG, de forma atomizada y modular, facilita la creación de estos «modelos» a partir de procesos simples.

Asimismo, las herramientas SIG que contienen funcionalidad de análisis suelen permitir el acceso a estas a traves de lenguajes de *scripting*, lo cual facilita la creación de flujos de trabajo y la automatización de rutinas complejas de análisis. Si bien este trabajo requiere mayores conocimientos, la flexibilidad y potencia que ofrece es mucho mayor.

Edición

Los datos geográficos con los que trabajamos en un SIG no son una realidad estática. La información contenida en una capa es susceptible de ser modificada o corregida, y las funciones que permiten estas tareas son importantes para dotar al SIG de versatilidad. Sin ellas, los datos espaciales pierden gran parte de su utilidad dentro de un SIG, ya que se limitan las posibilidades de trabajo sobre estos. Las funcionalidades de edición son, por tanto, básicas en una herramienta de escritorio.

Las operaciones de edición pueden emplearse para la creación de nueva cartografía, así como para la actualización de esta. Aunque las tareas de edición más habituales son las relacionadas con la edición de geometrías, no es esta la única edición que puede realizarse dentro de un SIG. Podemos distinguir las siguientes formas de edición:

- Edición de geometrías de una capa vectorial.
- Edición de atributos de una capa vectorial, incluyendo la adición o eliminación de atributos en toda una capa.
- Edición de valores de una capa ráster.

Las herramientas destinadas a la edición de entidades geométricas heredan sus características de los programas de diseño

asistido por ordenador (CAD), cuya funcionalidad principal es precisamente la edición de elementos gráficos. Aparecen en algunos casos herramientas adicionales, como sucede en el caso de que se registre información topológica.

Generación de cartografía

La mayoría de las herramientas de escritorio incorporan capacidades de creación de cartografía impresa, generando un documento cartográfico que posteriormente puede imprimirse y emplearse como un mapa clásico. Estas capacidades permiten la composición de documentos cartográficos de acuerdo con un diseño dado, y la impresión directa de estas en algún periférico tal como una impresora común o un *plotter* de gran formato.

Las funciones de diseño que se implementan por regla general en un SIG son similares a las que pueden encontrarse en un software de maquetación genérico, permitiendo la composición gráfica del documento general y el ajuste de los distintos elementos que lo forman. Entre estos elementos, destaca el mapa como tal, es decir, aquel que contiene la representación del dato geográfico.

Junto a esto, las herramientas de escritorio incluyen funcionalidades para automatizar la producción cartográfica, tales como la creación de plantillas o las generación de series de mapas que cubren en su conjunto una amplia extensión, fragmentando esta en unidades (Figura 6.2)

Estas posibilidades surgen de la separación entre los datos espaciales y el diseño del documento cartográfico que los contiene, del mismo modo que ya vimos que existe entre datos y parámetros de representación a la hora de visualizar los primeros.

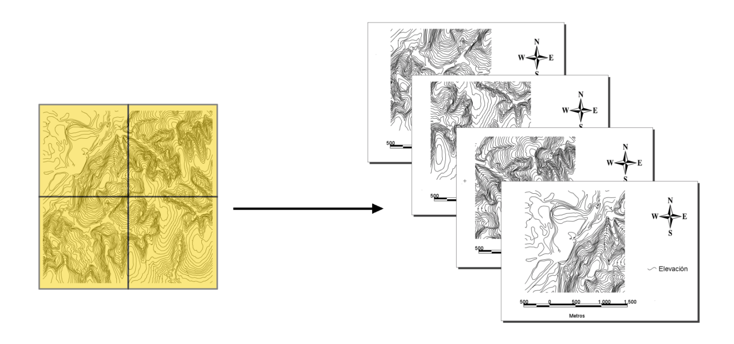


Figura 6.2: La automatización de las tareas de creación cartográfica permite simplificar la producción de grandes volúmenes de cartografía, como por ejemplo al dividir un área geográfica en una serie dada de mapas.

Cartografía en la Web (*Web–mapping*). Clientes y servidores

Uno de los avances más importantes en la historia de los SIG lo constituye la llegada del *Web Mapping*. Entendemos como tal a las tecnologías que permiten incorporar las ideas de los SIG dentro de paginas Web, utilizando un navegador Web como aplicación principal. Asimismo, estas tecnologías, junto a la importancia de Internet, han propiciado el desarrollo de otros elementos tecnológicos tales como servicios de datos remotos, que se utilizan tanto en las aplicaciones de escritorio como en el propio *Web Mapping*.

Los conceptos de *servidor* y *cliente* son fundamentales en este contexto. Veamos algunas ideas generales al respecto.

Conocemos como servidor al elemento encargado de proporcionar (servir) algún tipo de contenido. En el ámbito SIG, se trata fundamentalmente de datos geográficos, que constituyen el principal producto que se distribuye a través de la red dentro de nuestro campo.

El cliente es responsable de pedir ese dato al servidor, tomarlo y trabajar con él. Un navegador Web es un cliente, ya que realiza una petición para mostrar una página Web. Al introducir una dirección Web en la barra de direcciones del navegador, proporcionamos una serie de datos que son los que se emplean para realizar el proceso.

Supongamos la dirección Web:

```
http://victorolaya.com/writing
```

Al visitar esa página, se efectúa una petición a través de su dirección, la cual se compone de las siguientes partes:

- `http`: El protocolo a usar, que define la forma en que se van a comunicar cliente y servidor.
- `victorolaya.com`: Esta cadena identifica la máquina donde reside la página que buscamos. Es en realidad una versión más legible para el ojo humano de un código numérico que indica la dirección concreta.
- `writing`: La página que buscamos dentro de todas las que hay en esa máquina.

El proceso mediante el que podemos ver esa página en un navegador Web comprende los cuatro pasos siguientes:

1. El cliente realiza la petición.

2. La petición se conduce a través de la red hasta el servidor.

3. El servidor busca la página y la devuelve a través de la red en caso de encontrarla, o devuelve una pagina de error en caso de no tenerla.

4. El cliente recibe la página y la representa.

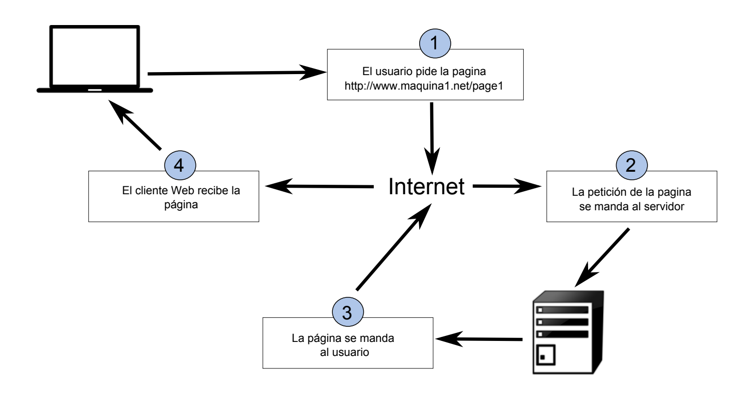


Figura 6.3: Esquema del proceso de consulta de una página Web desde un navegador.

La figura 6.3 muestra un esquema de este proceso.

Se establece una relación entre clientes y servidores, en la cual un número variable de clientes se «conectan» a un servidor, del cual obtienen una serie de datos cuando este responde a las peticiones formuladas por cada uno de ellos. En la arquitectura cliente–servidor, este último es el que posee la información a compartir a través de los servicios, mientras que en cada uno de los clientes se almacena tan solo la información personal de estos.

Veamos ahora algunas características de los servidores y clientes dentro del ámbito SIG.

Respecto a los servidores, las capacidades fundamentales en este contexto pueden dividirse en los siguientes grupos:

- Servir representaciones de los datos. El servidor puede responder directamente a este tipo de necesidades, preparando una imagen a partir de los datos geográficos de los que dispone. En el caso de que estos sean ya imágenes —por ejemplo, imágenes de satélite u ortofotos—, bastará servir estas, transmitiendo una versión escalada de las dimensiones exactas que

el cliente necesite para representar en pantalla. En caso de que los datos sean de tipo vectorial, o bien ráster sin una forma de representación implícita —por ejemplo, un Modelo Digital del Terreno— es necesario emplear algún método para asignarles dicha representación. Este puede ser asignado por defecto por el servidor, que establecerá una simbología fija, o bien ofrecer un servicio más complejo en el que el cliente no solo pide una representación gráfica de una serie de datos para una zona dada, sino que además puede especificar *cómo* crear esa representación.

- Servir los datos directamente. Una opción más flexible que lo anterior es que el servidor provea directamente los datos geográficos y sea después el cliente quien los utilice como corresponda, bien sea simplemente representándolos, o bien trabajando con ellos de cualquier otra forma, como por ejemplo analizándolos.
- Servir consultas. Un paso más allá en la funcionalidad que puede ofrecer el servidor es responder a *preguntas* realizadas por el cliente relativas a los datos, ya sean estas relativas a la parte espacial de dichos datos, o bien a su componente temática. El servidor puede ofrecer como respuesta conjuntos reducidos de los datos de los que dispone, o valores que describan a estos. Estas consultas pueden ser útiles, por ejemplo, para establecer filtros previos cuando se dispone de un conjunto amplio de orígenes de datos. Un cliente Web puede obtener datos de distintos servidores, y puede consultar si, para un zona dada, estos servidores disponen de información, sin más que consultar la extensión cubierta por los datos de cada uno de ellos y comprobar si se interseca con la región de interés. En función de la respuesta, puede o no realizarse posteriormente el acceso a los datos en sí. Como ya vimos, los metadatos son de gran utilidad para conseguir que este tipo de consultas se realicen de forma eficiente.

- Servir procesos. Por último, un servidor puede ofrecer nuevos datos, espaciales o no espaciales, resultantes de algún tipo de proceso o cálculo a partir de datos espaciales. En este caso, el proceso constituye en sí el servicio ofrecido por el servidor, y el cliente debe definir los parámetros de entrada de este y los posibles parámetros de ajuste que resulten necesarios. Los datos con los que se trabaja pueden ser proporcionados por el cliente, incorporándolos a su propia petición, o bien pueden residir en el propio servidor. También pueden emplearse datos en un servidor distinto, a los que el servidor de procesos puede acceder si estos están disponibles, convirtiéndose en cliente de ese segundo servidor (Figura 6.4).

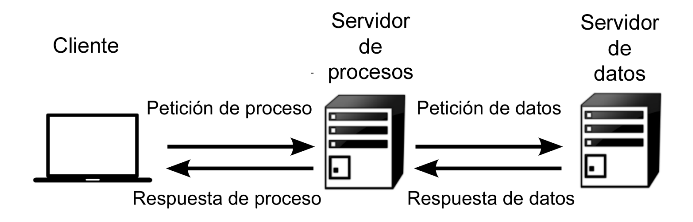


Figura 6.4: Esquema de acceso a un servicio de procesos remotos, el cual a su vez utiliza datos de un segundo servidor. El encadenamiento de procesos permite ampliar notablemente la utilidad de estos.

Respecto a los clientes, distinguimos en función de sus capacidades dos clases:

- Cliente pesado. El cliente *pesado* es una aplicación individual que no se ejecuta sobre otra aplicación soporte como puede ser un navegador Web. Al ser un programa independiente, debe ocuparse de toda la lógica del proceso y de proveer todas las funcionalidades necesarias, por lo que su tamaño es generalmente mayor.
  Los clientes pesados suelen permitir el uso de datos no procedentes del acceso a servicios, tales como datos en ficheros

locales, y no están pensados exclusivamente como clientes, sino como aplicaciones más amplias que además disponen de capacidades para aprovechar un determinado tipo de servicios.

En la actualidad, la práctica totalidad de SIG de escritorio son a su vez clientes pesados, ya que pueden consumir servicios tales como los descritos previamente en este apartado.

- Cliente ligero. Se denomina *ligero* por el tamaño relativamente reducido del programa en sí, lo cual va consecuentemente asociado a unas capacidades limitadas. Hablamos de clientes ligeros cuando nos referimos a *Web Mapping* y a clientes que se ejecutan sobre un navegador Web, ya que estos suelen ser sencillos en cuanto a sus funcionalidades.

  No obstante, los clientes Web empiezan progresivamente a ampliar sus posibilidades, y en ello juegan un importante papel otros servicios distintos a los de mapas o los de datos, como pueden ser los de procesos. Estos permiten que las funcionalidades adicionales no se implementen en el propio cliente (y por tanto sin aumentar en exceso su tamaño y sin disminuir su «ligereza»), sino que sean accedidas también como servicios remotos.

  La edición de capas es otra capacidad que puede aparecer en los clientes Web con funcionalidad más avanzada.

  La evolución de la cartografía Web en esta dirección se dirige desde el *Web Mapping* al denominado Web GIS, en el que la aplicación Web incluye la totalidad de capacidades clásicas del SIG de escritorio.

Algunas técnicas relacionadas con servicios SIG

Dos técnicas básicas que se emplean actualmente en los clientes que manejan información geográfica son el *tiling* y el *cacheo*. Estas técnicas permiten que la experiencia de trabajar con un cliente SIG, ya sea este ligero o pesado, sea más agradable,

logrando una mayor fluidez y superando en cierta medida las limitaciones de la red.

Ambas técnicas se utilizan en servicios en los que el servidor provee imágenes, ya que es en estos en los que resultan aplicables, y también donde es más necesario recurrir a este tipo de técnicas.

El tiling es una técnica consistente en dividir las imágenes con las que se trabaja en imágenes menores que formen un mosaico. Esto permite un trabajo más rápido, al utilizar unidades mínimas de menor tamaño y poder reducir la necesidad de transmitir datos a través de la red si se realiza una gestión correcta del conjunto de elementos de ese mosaico. En lugar de transmitir una única imagen se transmiten varias de menor tamaño y la información correspondiente a la posición relativa de estas.

El cacheo, por su parte, es una técnica no exclusiva del ámbito SIG, sino de la Web en general, y consiste en almacenar de forma temporal los datos obtenidos de un servidor en la máquina local. De este modo, si volviera a resultar necesario acceder a esos datos, no han de pedirse al servidor, sino que pueden recuperarse de la copia local, con las ventajas que ello tiene en cuanto a la velocidad de acceso y la fiabilidad del proceso.

El uso conjunto de *tiling* y *cacheo* puede disminuir sensiblemente el volumen de datos a transmitir para, por ejemplo, modificar el encuadre de un mapa en una aplicación SIG Web. La figura 6.5 muestra un ejemplo sencillo que servirá para comprender el ahorro de datos que puede conseguirse con el uso conjunto de estas técnicas.

Inicialmente, la aplicación encuadra una región que cubre 20 elementos o teselas. Si el usuario desplaza el encuadre para que cubra otro área distinta, como en el caso mostrado en la figura, el cliente realizará una nueva petición y obtendrá una nueva imagen, que tendrá exactamente el tamaño con que esa imagen va a representarse. Este es exactamente el mismo tamaño que la imagen que encontramos inicialmente en el encuadre original, y por tanto la representación de este encuadre original

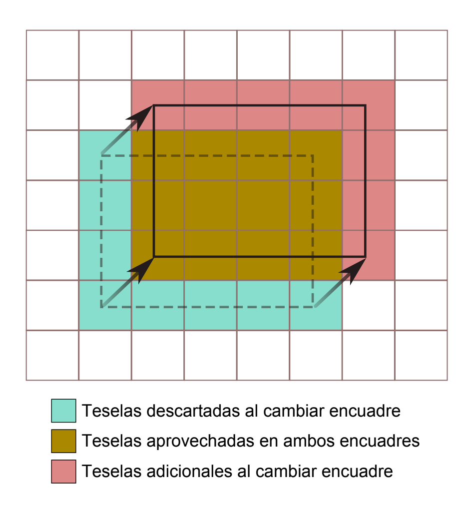


Figura 6.5: Esquema del uso de *tiling* y *cacheo* para optimizar la transmisión de datos en una aplicación SIG Web

y posteriormente el encuadre modificado requiere transmitir dos imágenes que cubren cada una de ellas veinte teselas.

Si, por el contrario, aplicamos conjuntamente las técnicas anteriores de *tiling* y *cacheo*, al variar el encuadre no es necesario obtener del servidor una imagen que cubra todo el área a representar, sino tan solo los 8 elementos correspondientes a la zona no cubierta por la imagen inicial, ya que los restantes ya habrán sido obtenidos con anterioridad y se encontrarán almacenados (*cacheados*) en nuestro ordenador. Es decir, el cliente crea la imagen a representar con 8 subimágenes pedidas al servidor y otras 12 ya descargadas previamente, reduciendo sensiblemente el volumen de datos pedidos al servidor.

Una técnica de reciente aparición es la denominada tiling vectorial. Aplicando los mismos principios que el *tiling*, es decir, la subdivisión de los datos de forma regular, las capas vectoriales

se «trocean» en el origen y se envían después solamente los datos necesarios para el área cubierta en el cliente.

Combinando este enfoque con el uso de capas con distinto detalle según la escala, se logran dos ventajas:

- Disminución del volumen de datos.
- Capacidad de modificar la simbología en el cliente.

Al enviar los datos en lugar de una representación de estos, el cliente es quien debe establecer la simbología. Al mismo tiempo, se logran ventajas en la experiencia de usuario, debidas principalmente a la escalabilidad de los datos vectoriales, que permite por ejemplo presentar transiciones más fluidas cuando se modifica la escala del mapa.

Obviamente, este tipo de enfoque es válido unicamente para el caso de capas vectoriales.

Estándares

Para garantizar el buen funcionamiento de un sistema cliente–servidor, es importante definir de forma adecuada cómo se establece la comunicación entre clientes y servidores. Esto obliga a establecer una cierta normalización y crear elementos que sean conocidos e implementados por las distintas partes. Esta *lingua franca* es lo que denominamos un estándar.

En circunstancias ideales, debe existir una total interoperabilidad con independencia de los formatos y las aplicaciones empleadas, pudiendo interactuar entre sí los distintos clientes y servidores. Los estándares son el elemento que va a permitir esa interoperabilidad, definiendo el marco común que clientes y servidores emplearán para entenderse. Los estándares son los encargados de aportar homogeneidad tecnológica.

La interoperabilidad implica que podemos sustituir unos elementos del sistema en el que se incluyen los clientes y servidores por otros distintos, teniendo la seguridad de que van a interaccionar entre ellos sin dificultades. Las funcionalidades que un cliente o servidor nos ofrece pueden ser distintas a las de otro, pero independientemente de su origen (independientemente del fabricante), si esos elementos implementan un estándar dado, siempre podrán interactuar con todos aquellos que también lo implementen.

Un estándar se considera como tal cuando es empleado por un grupo o comunidad, que lo acepta para la definición de las características de ese producto o servicio en su seno. Si únicamente es el uso del estándar el que lo ratifica como tal, se denomina estándar *de facto*. Existen estándares que se convierten en normas o estándares *de iure*, cuando estos son promovidos por algún organismo oficial de normalización o su uso se impone con carácter legal.

Un estándar *abierto* es aquel cuya definición se encuentra disponible y todo aquel que lo desee puede conocerla y emplearla para el desarrollo de la actividad relacionada con ese estándar.

Los principios fundamentales de los estándares abiertos son los siguientes:

- Disponibilidad. Los estándares abiertos están disponibles para todo el mundo para su lectura y uso en cualquier implementación.
- Máxima posibilidad de elección para los usuarios finales. Los estándares abiertos crean un mercado competitivo y justo, y no bloquean a los usuarios en el entorno de un vendedor particular.
- Gratuidad. Implementar un estándar es gratuito, sin necesidad de pagar, como en el caso de una patente.
- Discriminación. Los estándares abiertos y las organizaciones que los desarrollan no favorecen de ningún modo a uno u otro implementador sobre los restantes.

- Extensión o creación de subconjuntos de un estándar. Los estándares abiertos pueden ser extendidos o bien presentados como subconjuntos del estándar original.
- Prácticas predatorias. Los estándares abiertos pueden tener licencias que requieran a todo aquel que desarrolle una extensión de dicho estándar la publicación de información acerca de esa extensión, y el establecimiento de una licencia dada para todos aquellos que creen, distribuyan y vendan *software* compatible con ella.

Para tener una noción de lo que en la práctica realmente significa el uso de estándares abiertos en el campo de los SIG, podemos ver la figura 6.6, donde se representa el esquema de una arquitectura no interoperable. Es decir, una arquitectura que no se basa en este tipo de estándares.

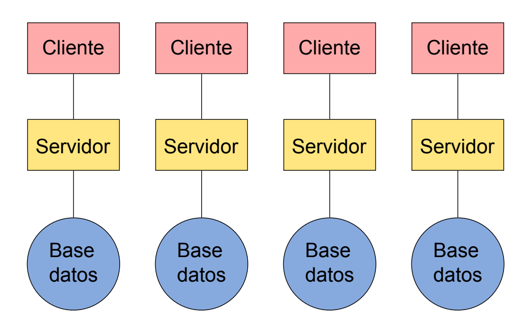


Figura 6.6: Esquema de una arquitectura no interoperable.

Los datos que se encuentran en cada base de datos son accesibles únicamente a través de un único cliente, que es aquel correspondiente al servidor que ofrece servicios basados en esos datos. Los restantes datos quedan fuera del alcance de ese cliente, ya que no es capaz de acceder a ellos. Las diferentes soluciones cliente–servidor crean en esta situación un conjunto de islas tecnológicas, cada una completamente independiente y sin posibilidad alguna de interactuar con las restantes.

Entre los principales inconvenientes de una arquitectura no interoperable como la representada podemos citar los siguientes:

- Desperdicio de recursos. Cada servicio debe gestionar sus propio conjunto de datos, lo cual requiere abundantes recursos y no es sencillo, además de implicar un elevado coste.
- Necesidad de conocer múltiples clientes. Si para acceder a cada servicio necesitamos su cliente particular, acceder al conjunto de servicios ofrecidos por esos servidores requiere por parte de los usuarios aprender a utilizar tantos clientes como servidores existan.
- Imposibilidad de combinar datos. Dos datos a los que pueda accederse a través de dos servidores distintos no podrán utilizarse simultáneamente en un único cliente, ya que este no podrá comunicarse con ambos servidores.
- Imposibilidad de combinar funcionalidades. Si acceder a los datos a través de un servidor solo se puede hacer empleando un cliente concreto, no existe la posibilidad de aprovechar las funcionalidades de otro cliente sobre esos mismos datos, y el usuario ve así limitadas sus posibilidades de trabajo.

En contraste con lo anterior, tenemos una situación de plena interoperabilidad basada en estándares abiertos como la representada en el esquema de la figura 6.7.

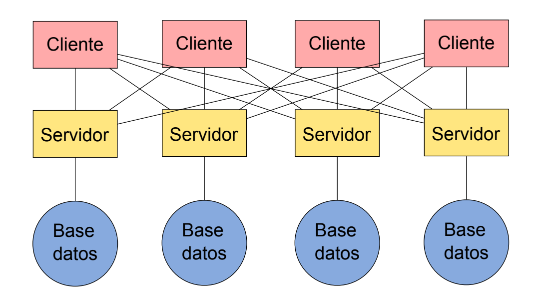


Figura 6.7: Esquema de una arquitectura interoperable.

En este caso, existe un servidor que es el que gestiona y ofrece los servicios para cada base de datos, pero a él pueden acceder todos los clientes, ya que por el hecho de estar basados en estándares abiertos es posible una comunicación plena entre dos cualesquiera de ellos.

Principales estándares

Los estándares más habituales en el campo de la información geográfica son elaborados por el Open Geospatial Consortium (OGC). OGC es una organización internacional y voluntaria dedicada a la elaboración de estándares en el ámbito de los contenidos geoespaciales.

Algunos de los estándares OGC más relevantes son los siguientes:

- WMS. Para obtener imágenes de mapas.
- WCS. Para obtener y consultar coberturas (capas ráster).
- WFS. Para obtener y editar entidades geográficas y sus atributos asociados (capas vectoriales).
- WPS. Para servicios de procesos remotos.
- GML. Para almacenamiento de información geográfica.
- CSW. Para consultas en catálogos.

Cada uno de estos estándares está descrito en una especificación, y estas están sujetas a cambios y mejoras, existiendo varias versiones en cada caso.

Junto a estos estándares, encontramos los elaborados por otras organizaciones como ISO o W3C, de ámbito más general, pero que también tienen importancia en el ámbito SIG. Entre ellos, destacar los estándares ISO encargados de definir el formato de almacenamiento de metadatos, o los estándares de W3C para la comunicación en Internet.

El SIG sobre plataformas móviles (teléfonos, tablets, etc.) tiene una innegable relación con las formas de SIG que hemos visto, tanto el SIG de escritorio como el SIG móvil. A los elementos de estas se suman las propias características de funcionar sobre un dispositivo móvil, que proporcionan un gran número de posibilidades adicionales.

Los dispositivos móviles actuales ofrecen dos funcionalidades fundamentales en este sentido: el acceso inalámbrico a Internet y la capacidad de conocer la posición del dispositivo. Esta última puede introducirse manualmente, calcularse a partir de la red, o bien con métodos basados en el propio dispositivo. A día de hoy, lo más habitual es el uso del sistema GPS, que entra dentro de este ultimo grupo. Una excepción es el caso de posicionamiento en interiores, donde el GPS no está operativo, y en el que pueden emplearse en su lugar métodos basados en una red local dentro del recinto en cuestión.

Las circunstancias anteriores permiten implementar una funcionalidad cercana al SIG clásico, pero con mayor potencial (por ejemplo, para la recogida de datos), así como ofrecer servicios basados en localización.

Algunos de los grupos principales en que estos servicios pueden agruparse son los siguientes:

- Navegación. Cálculo de ruta óptima entre dos puntos, guiado, etc.
- Inventario. Recogida de datos de cualquier tipo sobre el terreno, en los que se almacena la posición asociada al dato en sí.
- Información. Paginas amarillas espaciales o guías de viaje virtuales.
- Publicidad. Anuncios basados en localización, indicación de negocios cercanos, promociones para comercios próximos.

- Seguimiento. Tanto de personas como de productos, a lo largo de rutas predefinidas o no.
- Gestión. Por ejemplo, de infraestructuras, de instalaciones, o de flotas.

La información adicional que el dispositivo móvil provee permite ampliar el contexto de la aplicación SIG, gracias a que se conoce la localización, la orientación (hacia dónde se desplaza el usuario o qué tiene delante de sí), la velocidad, e incluso el entorno físico (iluminación, etc.)

Bases de datos

Las bases de datos son un elemento fundamental en el entorno informático hoy en día y tienen aplicación en la práctica totalidad de campos. Concebidas con un propósito general, son de utilidad para toda disciplina o área de aplicación en la que exista una necesidad de gestionar datos, tanto más cuanto más voluminosos sean estos. En el ámbito particular de los SIG, los datos son cada día más voluminosos, debido no solo a una mayor cantidad de información, sino también a una mayor precisión en esta, la cual implica un mayor volumen de datos. Además, presentan otra serie de características (uso múltiple, necesidad de acceso eficiente para análisis, necesidad de indexación, etc.), haciendo todas ellas que sea recomendable el uso de bases de datos y tecnologías específicas para su manejo.

Entendemos como *Base de Datos* un conjunto de datos estructurado y almacenado de forma sistemática con objeto de facilitar su posterior utilización. Los elementos clave de la base de datos son esa estructuración y sistematicidad, pues son responsables de las características que hacen de la base de datos un enfoque superior a la hora de gestionar datos.

Las ventajas de utilizar una base de datos frente a una gestión no organizada de estos las encontramos tanto en los propios

datos como en el uso que se hace de ellos. Algunas ventajas que afectan directamente a los datos son las siguientes:

- Mayor independencia. Los datos son independientes de las aplicaciones que los usan, así como de los usuarios.
- Mayor disponibilidad. Se facilita el acceso a los datos desde contextos, aplicaciones y medios distintos, haciéndolos útiles para un mayor número de usuarios.
- Mayor seguridad (protección de los datos). Mayor facilidad de replicación de datos y mejor sincronización.
- Menor redundancia. Con el consiguiente menor volumen de datos y mayor rapidez de acceso.
- Mayor eficiencia en la captura, codificación y entrada de datos.

Esto tiene una consecuencia directa sobre los resultados que se obtienen de la explotación de la base de datos, presentándose al respecto ventajas como, por ejemplo:

- Mayor coherencia. La mayor calidad de los datos que se deriva de su mejor gestión deriva en mayor calidad de los resultados.
- Mayor eficiencia. Facilitando el acceso a los datos y haciendo más sencilla su explotación, la obtención de resultados es más eficiente.
- Mayor valor informativo. Resulta más sencillo extraer la información que los datos contienen, ya que uno de los cometidos de la base de datos es aumentar el valor de estos como fuente de información.

Por último, los usuarios de la base de datos también obtienen ventajas al trabajar con estas, entre los que cabe citar:

- Mayor facilidad y sencillez de acceso. El usuario de la base de datos se debe preocupar únicamente de *usar* los datos, disponiendo para ello de las herramientas adecuadas y de una estructura solida sobre la que apoyarse.

- Facilidad para reutilización de datos. Esto es, facilidad para compartir.

De forma resumida, puede decirse que la principal bondad de una base de datos es la centralización que supone de todos los datos con los que se trabaja en un contexto determinado, con las consecuencias que ello tiene para una mejor gestión, acceso o estructuración de estos.

Bases de datos relacionales

De entre los distintos modelos existentes para plantear una base de datos, el más habitual, tanto dentro como fuera del ámbito de los SIG, es el de las denominadas bases de datos relacionales. Este modelo utiliza un esquema basado en tablas, que resulta a la vez sencillo de comprender y fácil de utilizar para el análisis y la consulta de los datos. Las tablas contienen un número dado de registros (equivalentes a las filas en la tabla), así como campos (columnas).

La tabla en sí se conoce como relación, ya que recoge la relación existente entre sus elementos, y constituye así el eje central del modelo relacional. Las columnas representan los distintos atributos asociados a la entidad, mientras que las filas conforman los distintos registros. Una fila se forma con un conjunto de n atributos, constituyendo una tupla.

Una base de datos contiene normalmente más de una tabla, ya que suelen ser muchos los tipos de datos a almacenar y resulta conveniente dividirlos en distintas tablas. Además de las relaciones que la tabla en sí implica, es necesario definir interrelaciones entre las distintas tablas, y para ello se emplean los denominados atributos clave. Un atributo clave es aquel que tiene valor único e invariable para cada tupla, pudiendo servir para representar a esta plenamente. Por ejemplo, en una tabla con nombres de personas e información adicional sobre ellas, el número de su DNI puede servir como atributo clave.

Cuando trabajamos con datos espaciales, es habitual emplear la componente espacial como clave, ya que esta suele ser única.

Las interrelaciones entre tablas pueden ser de distintos tipos, según el número de entidades de una tabla con los que se relacionen las entidades de la otra. Tenemos así relaciones de uno a muchos, de uno a uno o de muchos a muchos. Por ejemplo, en una tabla con entidades que representan personas y otra con entidades que representan ciudades, si establecemos una interrelación *vive en*, se tratará de una interrelación de uno a muchos, ya que en una ciudad pueden habitar varias personas.

Sistemas gestores de bases de datos

Junto con las bases de datos, el elemento fundamental para el aprovechamiento de estas son los Sistemas Gestores de Bases de Datos (SGDB o DBMS, del inglés *DataBase Management System*). Estos sistemas representan un elemento intermedio entre los propios datos y los programas que van a hacer uso de ellos, facilitando las operaciones a realizar sobre aquellos. Los programas tales como un SIG no acceden directamente a la base de datos, sino que lo hacen a través de un SGBD.

Algunas características que ha de tener un SGBD son las siguientes:

- Acceso transparente a los datos. El SGBD debe crear una abstracción de los datos que haga el trabajo con estos más sencillo, ocultando aspectos internos que no sean relevantes para dicho trabajo.
  Procedimientos como las consultas se realizan a través del SGBD, que es quien se encarga de interpretar dichas consultas, aplicarlas sobre la base de datos y devolver el resultado correspondiente. El SIG no accede a los datos, sino que se comunica con el SGBD y deja en manos de este el proceso de consulta en sí.

- Protección de los datos. Si la base de datos almacena información sensible, el SGBD debe controlar el acceso a esta, restringiendo el acceso cuando corresponda (por ejemplo, estableciendo distintos permisos de acceso para distintos tipos de usuarios) e implementando los mecanismos de protección necesarios.
- Eficiencia. El SGBD debe ser capaz de gestionar de forma fluida grandes volúmenes de datos o de operaciones (por ejemplo, muchos usuarios accediendo simultáneamente), de modo que dé una respuesta rápida a las peticiones de los usuarios de la base de datos.
- Gestión de transacciones. Las operaciones sobre la base de datos tales como la adición o borrado de un registro se realizan mediante transacciones. El SGBD ha de encargarse de gestionarlas de manera eficiente y segura para que todos los usuarios de la base de datos puedan hacer su trabajo de forma transparente. Se denomina transaccional al SGBD capaz de garantizar la integridad de los datos, no permitiendo que las transacciones puedan quedar en un estado intermedio.

En este sentido, resulta de especial importancia la existencia de lenguajes de consulta, que son los que una aplicación utilizará para comunicarse con el SGBD y expresar las operaciones que desea realizar con los datos de la base de datos. El lenguaje de consulta mas extendido es SQL (Standard Query Language)

Bases de datos espaciales

Todo cuanto hemos visto en los puntos anteriores constituye el conjunto de ideas fundamentales sobre las que se asienta la creación y uso de bases de datos de cualquier índole. La inclusión de datos espaciales en este esquema no es en absoluto obvia, y presenta una complejidad adicional que requiere de nuevos planteamientos. Para que una base de datos pueda considerarse espacial, debe adaptarse y añadir elementos adicionales.

En primer lugar, el dato espacial debe poder almacenarse de forma nativa en la base de datos. Esto quiere decir que una geometría debe poder almacenarse asociada a una entidad en una tabla, del mismo modo que sucede con otros tipos de datos tales como valores numéricos o cadenas de texto. El dato no solo debe poder almacenarse, sino también entenderse por parte del SGBD, para así comprender su naturaleza espacial y poder responder a peticiones relativas a esta por parte del usuario. Esto se denomina almacenamiento transparente, frente al almacenamiento opaco, en el cual la base de datos es capaz de recoger cualquier tipo de valor, pero sin ser capaz de entender su naturaleza y utilizarlo.

Aunque existen planteamientos para almacenar datos ráster en bases de datos, las bases de datos espaciales trabajan principalmente con datos vectoriales y están mejor adaptadas a estos. Las geometrías del dato vectorial se incluyen, como ya se ha dicho, dentro de los valores de un registro de la tabla (que se corresponde con una entidad en el modelo de datos vectoriales). Por su parte, la componente temática del dato espacial puede almacenarse sin problema en la base de datos, sin necesidad de ningún tipo de adaptación.

Cuando la base de datos está preparada para almacenar y trabajar con los datos espaciales, es necesario adaptar el lenguaje de consulta. A las operaciones habituales que un SGBD es capaz de realizar en función de los datos, se añaden otras que utilizan las propiedades espaciales del dato espacial. Se tiene así un lenguaje de consulta espacial, que permite consultas con componente espacial.

Consultas

Entendemos por consulta una operación en la cual *preguntamos* a los datos geográficos algún tipo de cuestión simple, generalmente basada en conceptos formales sencillos. Este tipo

de análisis, aunque no implica el uso de conceptos analíticos complejos, es uno de los elementos clave de los SIG, pues es parte básica del empleo diario de estos.

Aunque las consultas no son algo exclusivo de las bases de datos, es mediante el concurso de estas que adquieren toda su potencia y permite efectuar gran parte de las operaciones habituales de un SIG.

En el contexto espacial, una consulta representa un uso similar al que damos a un mapa clásico, cuando en base a este respondemos a preguntas como *¿qué hay en la localización X?* o *¿qué ríos pasan por la provincia Y?* No obstante, no debemos olvidar que los datos espaciales tienen dos componentes: una espacial y otra temática. Preguntas como las anteriores hacen referencia a la componente espacial, pero igualmente pueden efectuarse consultas que se apliquen sobre la parte temática. Y más aún, pueden efectuarse consultas conjuntas que interroguen a los datos geográficos acerca de los atributos espaciales y temáticos que estos contienen.

Un ejemplo muy sencillo de consulta es lo que conocemos en un SIG como selección. De todos los registros de la tabla de datos, aquellos que cumplen el criterio indicado se marcan como seleccionados, y posteriormente pueden utilizarse únicamente estos como base de otro análisis, o simplemente el usuario puede ver cuáles han sido los seleccionados para así obtener la respuesta a su consulta. La figura 7.1 muestra un ejemplo típico de esto, en el que el usuario define un área rectangular y se seleccionan las entidades que cumplen la condición de intersecar con él. Los criterios de selección pueden ser sencillos como este, o más elaborados y complejos.

Una consulta nos vale también para extraer información de una base de datos de acuerdo a nuestras necesidades, y para crear posteriormente y a partir de dicha información una nueva capa. Esta operación es útil cuando la base de datos de la que disponemos es muy voluminosa y solo resulta de interés para

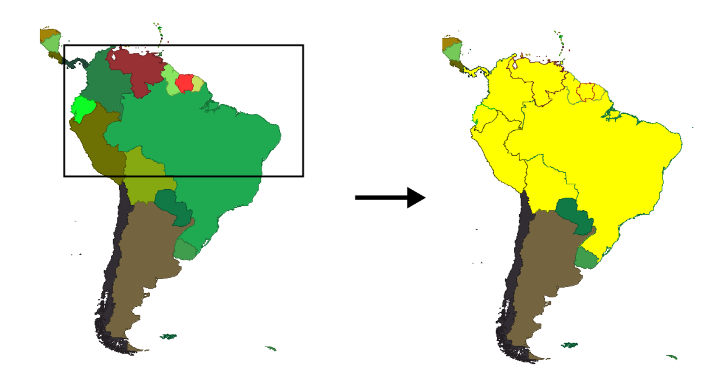


Figura 7.1: Una consulta sencilla mediante la definición gráfica de un rectángulo. Todas las entidades dentro de este son el resultado de la consulta y quedan seleccionadas en el SIG.

nuestro trabajo una parte de ella. Puede tratarse de una parte en el sentido espacial (la base de datos contiene datos a nivel mundial y se quiere trabajar a nivel estatal), en el sentido temático (la base de datos contiene mucha información de cada entidad y solo interesan algunos campos), o en una combinación de ambas. Para extraer dicha parte y trabajar únicamente con ella, utilizaremos una consulta.

Veamos algunos ejemplos de consultas. Sea una capa con los distintos países del mundo y una serie de valores económicos y sociales asociados a cada uno de ellos. Consideremos las siguientes preguntas:

- ¿Qué países tienen un Producto Interior Bruto mayor que el de España?
- ¿Qué países han experimentado un crecimiento económico en el último año?
- ¿Cuántos países tienen más de 200 millones de habitantes?

En todos estos casos estamos haciendo referencia a países, los cuales, como sabemos, estarán asociados a elementos geométricos que definan sus propiedades espaciales, es decir, a una componente espacial. Esta componente es la que permite que, además de poder plantear las consultas anteriores, podamos representar cada país en la pantalla y visualizarlo, o saber cuáles de ellos se encuentran en el hemisferio norte (esta sería una consulta espacial, de las que más adelante en este mismo capítulo veremos).

Sin embargo, cuando realizamos consultas como las tres anteriores, no acudimos para nada a la componente espacial. Consultas como estas podrían resolverse si en lugar de una capa dentro de un SIG tuviéramos, por ejemplo, un simple anuario estadístico lleno de tablas con datos correspondientes a cada país.

Las consultas pueden incluir varios criterios en una sola pregunta. Por ejemplo:

- ¿Qué países de la zona euro tienen más de 40 millones de habitantes?
- ¿En qué países de habla inglesa aumentó la población durante el último año?

Para expresar esas consultas se han de incluir elementos de la denominada lógica booleana. Esta implica el uso de operadores lógicos, mediante los cuales se reescribirían las consultas anteriores de la siguiente manera:

- ¿Qué países tienen como moneda el euro *y* a la vez tienen más de 40 millones de habitantes?
- ¿Que países hablan inglés *y* sufrieron un aumento de población durante el último año?

Los lenguajes de consulta que se emplean para transmitir estas operaciones a un SGBD permiten el uso de tales operadores para formular consultas.

Si el SGBD es de tipo espacial y *entiende* que algunas de las columnas de una tabla contiene información espacial (es decir, que cada entidad no solo tiene información temática), pueden plantearse consultas que hacen uso de esta, tales como las siguientes.

- ¿Qué países comparten frontera con Alemania?
- ¿Cuántos países se encuentran completamente en el hemisferio sur?
- ¿Qué países están a menos de 2000 km de España?

Para dar respuesta a esas cuestiones, basta analizar la componente espacial y no necesitamos para nada los datos con los que hemos trabajado anteriormente. Son consultas puramente espaciales. Aunque estas consultas amplían lo que ya conocemos, en realidad no abren ninguna nueva vía de estudio de los datos geográficos. Son consultas a las que podríamos responder utilizando un mero mapa impreso, sin aprovechar el hecho de que dentro de un SIG las componentes espacial y temática se hallan íntimamente vinculadas. La verdadera potencia de las consultas espaciales la encontramos en la combinación de estas consultas sobre la componente espacial y las que vimos anteriormente sobre la componente temática. Así, se pueden plantear, por ejemplo, cuestiones como:

- ¿Qué países del hemisferio norte tiene una densidad de población mayor que la de Perú?
- ¿Cuántos países con más de 10 millones de habitantes se encuentran a menos de 1000 km de la frontera de Rusia?

Estas consultas incorporan elementos que hacen necesario acudir a la tabla de atributos, y otros que requieren analizar la componente espacial, estudiando las relaciones espaciales y topológicas de las geometrías asociadas.

Las consultas pueden incluir varias capas. Por ejemplo, si ademas de la capa de países disponemos de una capa de ríos del

mundo, podríamos responder a la pregunta *¿qué países atraviesa el Nilo?*

Igualmente, las uniones entre tablas que hemos visto para el caso de la componente temática pueden establecerse mediante un criterio espacial. Se tiene así una unión espacial.

Un ejemplo muy sencillo de unión espacial es el que encontramos si combinamos la capa de países del mundo que venimos utilizando con una capa de ciudades del mundo. Podemos unir a la tabla de esta segunda capa todos los valores que caracterizan al país al que pertenece cada ciudad. Si existe un campo común entre ambas tablas de atributos (por ejemplo, el nombre del país), esto serviría para efectuar esta unión. No obstante, esto no es necesario, ya que existe otro elemento común que no se encuentra almacenado dentro de la tabla, pero que puede tomarse de la componente espacial: toda ciudad debe estar situada dentro de los límites del país al que pertenece. Esto sirve para establecer la relación entre las tablas, y cada ciudad debe relacionarse con aquella entidad dentro de cuya geometría se encuentre el punto que la representa.

Índices espaciales

Si realizamos una consulta a una base de datos, el resultado es un subconjunto de esta con los elementos que cumplen el criterio expresado en la consulta. Si se implementa de forma *directa* dicha consulta, esta operación implica comprobar todos los elementos de la base de datos y ver cuáles son los que cumplen con el citado criterio. Teniendo en cuenta que una base de datos puede tener un gran tamaño, esta forma de proceder no es la óptima.

Los índices nos permiten *alcanzar* los elementos que constituyen la respuesta a nuestra consulta, haciéndolo de la forma más rápida y llegando hasta ellos sin tener que pasar por todos los restantes.

Un ejemplo fácil de entender es el de una guía telefónica en la que los nombre están ordenados alfabéticamente. Gracias a ese orden y a que se conoce el alfabeto, se puede buscar rápidamente un nombre sin necesidad de leer todos ellos.

Al utilizar una base de datos, si no disponemos de un índice deberemos recorrer toda ella para dar respuesta a nuestras consultas. No sabemos *dónde* buscar las respuestas a nuestras consultas, del mismo modo que si no supiéramos que carece de sentido buscar en la letra F el número telefónico del señor Pérez.

Ademas de índices para datos de tipo numérico o texto, en los que resulta obvio establecer un orden natural, en el ámbito de los SIG tienen importancia los denominados índices espaciales. Aunque sus fundamentos teóricos son distintos, el concepto es similar al de índices de bases de datos no espaciales: elementos que permiten optimizar las consultas mediante una correcta estructuración de los datos, en particular en este caso de su componente espacial.

Puede entenderse la idea de un índice espacial mediante un sencillo ejemplo de cómo empleamos ideas parecidas a los índices espaciales de forma natural cuando tratamos de resolver una consulta espacial sin la ayuda de un SIG. Supongamos que tenemos nuestro mapa de países del mundo y queremos averiguar qué países tienen su frontera a menos de 3000 kilómetros de la frontera de España. ¿Cómo operaríamos de manera natural para dar respuesta a esta consulta?

La solución más inmediata es medir la distancia entre España y todos los países restantes, y después tomar aquellos que hayan arrojado un resultado de distancia menor a 3000. La operación daría el resultado esperado, pero implicaría un gran número de mediciones, y no sería una forma óptima de operar. Más probable es que no efectuemos mediciones con los países de América, pues un conocimiento básico de geografía basta para saber que todos ellos se encuentran a más de 3000 kilómetros. No sabemos

exactamente a qué distancia se encuentran, pero sabemos que no van a cumplir el criterio establecido en la consulta.

Ese conocimiento básico de geografía que tenemos es en realidad una especie de índice espacial. No sirve para saber las distancias exactas ni resolver la consulta por completo, pero sirve para dar una aproximación y facilitar el trabajo. Descartamos un buen numero de países de forma casi inmediata, y luego solo realizamos las operaciones costosas (la medición) con un subconjunto del total.

De modo similar, los índices espaciales nos permiten obtener resultados en un área concreta sin necesidad de analizar todo el espacio ocupado por el total de los datos. Gracias a ello, hacen las consultas mas efectivas y permiten trabajar con grandes volúmenes de datos.

Los índices espaciales se almacenan junto con los datos a los que hacen referencia, bien en ficheros adicionales o dentro de la propia base de datos, en caso de utilizarse una. Los SGBD espaciales tienen capacidades para calcular estos índices espaciales y almacenarlos en la base de datos, recurriendo a ellos cuando se realiza una consulta que requiera su uso.

Análisis espacial. Fundamentos

El análisis espacial es una de las tareas fundamentales sin las cuales el concepto de SIG no alcanza su verdadero significado.

El análisis espacial es el estudio cuantitativo de aquellos fenómenos que se manifiestan en el espacio. Ello indica una importancia clave de la posición, la superficie, la distancia y la interacción a través del propio espacio.

Ejemplos de análisis que realizamos con cartografía fuera de un SIG son el buscar en un mapa dónde se sitúa el pico más alto, ver la elevación concreta a la que se encuentra un elemento dado tal como una población, o planificar una jornada turística viendo qué lugares de interés podemos visitar o cómo llegar desde uno a otro de estos lugares haciéndolo por las mejores carreteras o de la forma más rápida. Estas actividades habituales son ejemplos de análisis geográficos que podemos igualmente realizar dentro de un SIG.

Mediante el análisis podemos generar nuevos datos que pueden ser nuevas capas de datos geográficos, tablas de datos, valores escalares o vectores.

En ocasiones, los resultados expresan la misma variable que el dato de partida (por ejemplo, el cálculo de una media), y en

otros las variables de entrada y salida son distintas (por ejemplo, si a partir de una capa de elevaciones calculamos una de pendientes).

Asimismo, todo análisis espacial parte de un conjunto de datos espaciales, pudiendo estos ser de un único tipo, o de varios distintos que se combinan en un procedimiento concreto. Por ejemplo, en el caso de calcular la localización del punto más alto, el resultado es una sencilla coordenada, y tan solo se utiliza la variable elevación. En el caso de la altura media de una ciudad, se utilizan dos entradas: por un lado, la elevación, y por otro, el emplazamiento de la ciudad. Aunque un mapa clásico contiene toda esa información en una única hoja, en realidad son dos elementos distintos combinados a la hora de representarlos. En términos más acordes con un SIG, podemos decir que tenemos dos capas distintas que utilizamos como entradas.

El análisis dentro un SIG nos permite tanto formular como responder a cuestiones. Estas cuestiones pueden ser:

- Relativas a posición y extensión
- Relativas a la forma y distribución
- Relativas a la asociación espacial
- Relativas a la interacción espacial
- Relativas a la variación espacial

Algunos ejemplos de análisis espacial

Algunos ejemplos de análisis espacial son los siguientes.

Consulta espacial

Vimos las consultas en detalle dentro del capítulo dedicado a las bases de datos.

Pueden combinarse con otros de los análisis disponibles, por ejemplo para la selección de una serie de elementos sobre los que posteriormente se desarrollara el análisis en cuestión.

Análisis topológico

Pueden plantearse consultas referidas no solo a la posición de los elementos geográficos, sino a la relación con otros elementos. La existencia de topología puede emplearse para la realización de consultas que respondan a cuestiones como:

- ¿Cómo llegar desde mi posición actual hasta una coordenada concreta por la red viaria existente?
- ¿Qué comunidades autónomas comparten límite con Madrid?

Medición

La existencia de una referencia espacial para cada uno de los elementos con los que trabajamos en el análisis dentro de un SIG hace que podamos cuantificar otra serie de parámetros también espaciales. Entre las mediciones más básicas, encontramos las distancias, áreas, perímetros o factores de forma. Mas elaboradas, encontramos otras como pendientes o indices derivados de medidas simples.

Combinación

Uno de los procedimientos más habituales y más característicos dentro del uso de un SIG es la combinación o superposición de varias capas de información. La propia estructura de la información geográfica en capas facilita notablemente estos procedimientos y convierte a los SIG en plataformas ideales para llevar a cabo análisis donde se combina información sobre diversas variables.

En el caso de capas vectoriales, las operaciones de solape tales como unión, intersección, diferencia o recorte, son habituales. La figura 8.1 muestra un ejemplo de la operación de intersección con dos capas de polígonos.

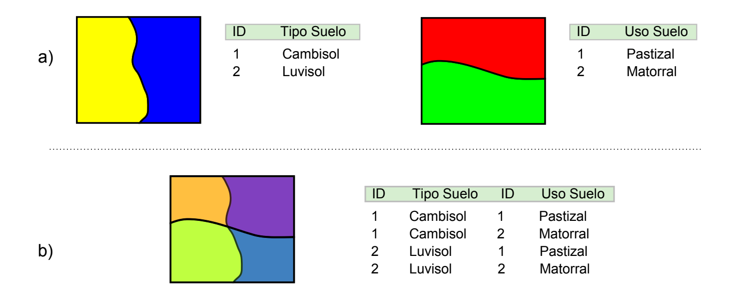


Figura 8.1: Operación de intersección de dos capas de polígonos.

Transformaciones

Podemos englobar dentro de este grupo una amplia serie de procedimientos que modifican los elementos de entrada de diversas formas. Entre los más habituales, encontramos la transformación de coordenadas, la simplificación de geometrías, o la creación de áreas de influencia o la reclasificación de valores. Estas transformación pueden afectar tanto a la componente espacial como a la componente temática del dato.

Un caso particular, ya mencionado en un capítulo anterior, es la conversión entre modelos de datos, esto es, entre el modelo ráster y el vectorial. La figura 8.2 muestra un ejemplo de esto. Partiendo de un mapa escaneado (una capa ráster) con curvas de nivel, pueden detectarse estas y crearse una capa vectorial con dichas curvas de nivel. Estas pueden posteriormente convertirse en un Modelo Digital de Elevaciones (ráster) mediante interpolación, el cual es posible convertir de nuevo en una capa vectorial de líneas.

Análisis de superficies

El análisis de superficies es uno de los más potentes de cuantos encontramos en un SIG. Desde parámetros básicos como

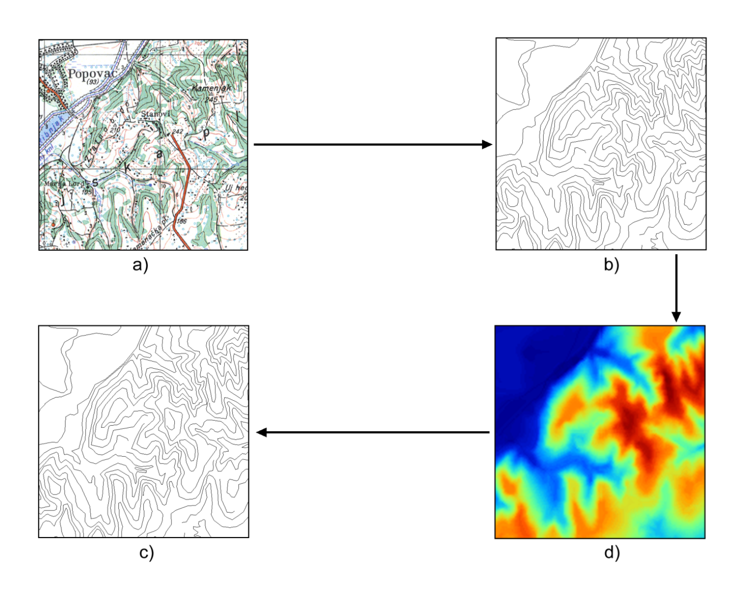


Figura 8.2: Conversión entre distintos modelos de datos para una capa de elevaciones.

la pendiente o la orientación hasta parámetros morfométricos muy específicos, pasando por todas las herramientas del análisis hidrológico, la batería de operaciones disponibles es muy amplia.

Estadística descriptiva

Los elementos de la estadística clásica tienen sus equivalentes en los datos espaciales, y nos permiten calificar cuantitativamente los datos con los que trabajamos. Se incluyen aquí descriptores de centralidad y dispersión, de dependencia espacial o el estudio de patrones espaciales, entre otros muchos. Estos pueden a su vez usarse para el contraste de hipótesis que contengan una cierta componente espacial.

Por ejemplo, estos estadísticos nos permiten dar respuesta a cuestiones del tipo:

- ¿Es constante la media de altura a lo largo de toda la geografía de mi país?
- ¿Existe alguna dirección predominante en los movimientos de individuos de una especie o se desplazan erráticamente?

Inferencia

Otro análisis estadístico de gran importancia en los SIG es el que permite inferir comportamientos de las distintas variables y estudiar, por ejemplo, la forma en que estas van a evolucionar a lo largo del tiempo.

El establecimiento de modelos de cambio y variación representa una de las herramientas más actuales en el campo de los SIG, y un campo en abundante desarrollo.

Toma de decisiones y optimización

La estructura de la información geográfica en capas dentro de un SIG, favorable como ya vimos para la superposición de capas, lo es igualmente para estudiar de forma combinada los efectos de distintos factores. Este estudio nos permite luego responder a cuestiones como, por ejemplo:

- ¿Cuál es el mejor lugar para emplazar una nueva construcción en función de su impacto sobre el medio?
- ¿Dónde situar un nuevo hospital para que el servicio en la comarca mejore lo máximo posible?

Modelización

La creación de modelos espaciales dentro de un SIG es una tarea aún pendiente de mucho desarrollo. No obstante, existe un gran número de modelos en los más diversos campos, y la

arquitectura de datos y procesos de los SIG es propicia para la implementación de otros nuevos.

Particularidades de los datos espaciales para su análisis

Las características propias de los datos espaciales dotan a estos de una gran potencialidad de análisis, al tiempo que condicionan o limitan otras operaciones. Algunas de estas características representan problemas que han de tenerse presentes en el análisis; otros son simplemente conceptos básicos que deben conocerse pero no han de implicar necesariamente una dificultad asociada.

Escala

A la hora de estudiar la información geográfica, podemos hacerlo a distintos niveles y, dependiendo del nivel elegido, los resultados serán de una u otra naturaleza. Debido a esto, además de considerar la escala cartográfica para la representación y gestión de datos en un SIG, es necesario considerar la escala de análisis.

La escala de análisis depende del dato en sí (precisión, tipo, etc.), así como del análisis que se va a realizar con él.

Como se muestra en la figura 8.3, si para definir las formas de relieve en un punto dado lo hacemos considerando dicho punto y los valores de elevación a su alrededor, la caracterización que hagamos varía en función de la dimensión de esa zona alrededor (que es la que define la escala de análisis). Para valores pequeños de dicha zona de análisis, el punto analizado puede definirse como una cima, mientras que aumentando la escala de análisis se advierte que el punto se sitúa en el fondo de un valle.

Por tanto, debemos observar el relieve desde la distancia correcta a la cual la información que nos proporciona es la más

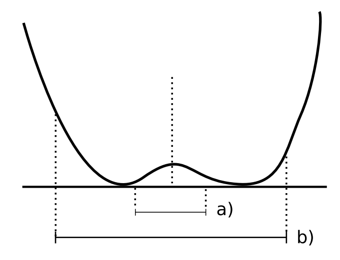


Figura 8.3: Dependiendo de la escala de análisis, un mismo relieve puede ser caracterizado como cima (a) o fondo de valle (b)

adecuada para un análisis dado. Además de existir una escala de mayor relevancia para un análisis concreto, es de interés el trabajar a múltiples escalas y combinar los resultados.

Otro ejemplo de cómo la escala de análisis condiciona los resultados obtenidos lo encontramos en el caso de efectuar mediciones. Como puede verse en la figura 8.4, la unidad de medida empleada provoca que se obtengan resultados distintos.

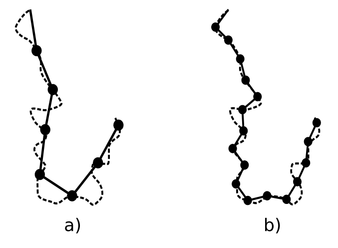


Figura 8.4: La unidad de medida empleada modifica el resultado obtenido.

La unión del valor resultante con la escala a la que se ha obtenido tiene en conjunto pleno significado, pero ese valor por sí mismo carece de dicho significado.

El concepto de fractal tiene una implicación directa en este hecho.

El propio formato de almacenamiento condiciona el efecto de la escala, ya que puede imponer límites. Tal es el caso cuando se trabaja con capas raster, en las que el tamaño de celda delimita la precisión que puede obtenerse en el análisis.

El Problema de la Unidad de Área Modificable

Muchas de las variables con las que trabajamos dentro de un SIG no pueden medirse de forma puntual, y por ello han de estudiarse para un área dada. Ejemplos de este tipo de variables son el porcentaje de población en un rango de edad determinado o la densidad media de población.

Las áreas que se definen para poder trabajar con las variables de esta índole son esencialmente arbitrarias, tales como países, regiones o distritos, que se establece sin ningún criterio propio del análisis espacial. La utilización de una u otra unidad altera los resultados extraídos de las variables estudiadas.

Este problema, por tener relación con la elección de la unidad de agregación de la información, se conoce como *Problema de la Unidad de Área Modificable* (PUAM).

Un problema particular relacionado con el PUAM es la denominada falacia ecológica, que consiste en asumir que los valores calculados para una unidad de área pueden aplicarse a los individuos de la población existente en dicha área. Sólo en el caso de que exista una completa homogeneidad para la variable analizada, lo cual raramente sucede, la anterior suposición sería cierta.

Autocorrelación espacial

Se denomina autocorrelación espacial a la existencia de una correlación de la variable consigo misma, de tal modo que los valores de esta variable en un punto guardan relación directa con los de esa misma variable en otros puntos cercanos. Por ejemplo, en el caso de medirse la temperatura, los puntos cerca de un foco

de calor tendrán una temperatura mayor que aquellos cerca de focos fríos. Si estudiamos la distribución de una enfermedad infecciosa, es más probable que los casos se encuentren agrupados, de forma que la presencia de un alto número de casos implique también una alta incidencia en poblaciones cercanas.

Otra forma de expresar la autocorrelación espacial es mediante la conocida como Primera Ley Geográfica de Tobler, que establece que «todo está relacionado con todo, pero las cosas próximas entre sí están más relacionadas que las distantes».

La autocorrelación espacial, tal y como se ha descrito antes, es positiva. Puede, no obstante, existir una autocorrelación espacial negativa, si los valores altos se rodean de valores bajos y viceversa.

En caso de no existir ningún tipo de autocorrelación espacial, se tiene que los datos recogidos en una serie de puntos son independientes entre sí y no se afectan mutuamente, sin que tenga influencia de la distancia.

La figura 8.5 muestra unas sencillas capas ráster en las que se presentan los tres tipos de autocorrelación espacial anteriores.

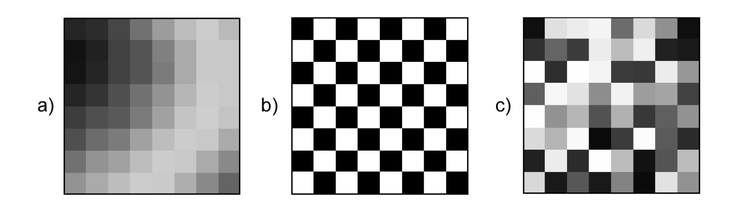


Figura 8.5: a) Autocorrelación espacial positiva. b) Autocorrelación espacial negativa. c) Ausencia de autocorrelación espacial (independencia)

Las consecuencias de la existencia de autocorrelación espacial son numerosas y de gran importancia.

Por una parte, muchos de los análisis estadísticos suponen la independencia de la variable. Puesto que existe una dependencia

de la componente espacial, será necesario para obtener resultados correctos introducir dicha componente espacial como una variable más.

Algo similar sucede cuando los datos presentan alguna tendencia espacial (los valores de una variable están relacionados con sus propias coordenadas geográficas), ya que esto tambien invalida el supuesto de la independencia de los datos.

Existiendo autocorrelación espacial, y siendo esta positiva, la inferencia estadística es menos eficaz que si se cuenta con un número igual de observaciones de una variable independiente.

La autocorrelación espacial no es, no obstante, un elemento que siempre tenga consecuencias negativas. Puesto que los puntos cercanos a uno dado guardan relación con este, la autocorrelación puede aprovecharse para estimar valores en un punto cualquiera si conocemos los valores en puntos cercanos. Este es el fundamento de los métodos de interpolación

Existencia de estructura

Tanto la disposición de los datos como las propiedades de la variable estudiada (por ejemplo, la propia autocorrelación espacial como propiedad intrínseca) exhiben una estructura determinada. Esta estructura puede condicionar los resultados del análisis y tener influencia sobre estos.

Los dos principales conceptos estadísticos que definen la estructura espacial de los datos son la estacionaridad y la isotropía. La estacionaridad indica que el proceso es invariante a la traslación. Es decir, que las propiedades son constantes en el espacio y no existe tendencia alguna. La isotropía indica que el proceso es invariante a la rotación y tiene lugar del mismo modo en todas direcciones.

Efectos de borde

Las zonas que estudiamos dentro de todo análisis espacial tienen unos límites establecidos. Estos límites vienen definidos de forma artificial —el límite de la fotografía aérea de la que disponemos, por ejemplo— o bien de forma natural —si estudiamos un bosque junto a un pantano, el bosque encuentra su límite al borde de este último—. La presencia de estos bordes distorsiona el resultado de los análisis, en especial para aquellos parámetros no puntuales que requieren la definición de un area de estudio (densidades, etc., como ya vimos para el caso del PUAM)

En algunos casos, el efecto de borde no se manifiesta únicamente para puntos cercanos a dicho borde, sino para todos aquellos relacionados o conectados con él según un determinado criterio, con independencia de su distancia a este.

Visualización y representación de datos espaciales.

Visualizar la información geográfica es una parte fundamental del trabajo con un SIG. Aunque algunos datos incluyen su propia manera de representarse —por ejemplo, las imágenes de satélite, las ortofotos, o las obtenidas de un servicio de mapas—, en el SIG es en general el usuario quien define la forma de representar el dato. Es decir, el usuario de SIG toma el papel del cartógrafo, y por tanto debe conocer los fundamentos que este utiliza para la creación de mapas.

Además de las herramientas y conceptos cartográficos clásicos, los SIG incorporan elementos de la denominada visualización científica, tales como la interactividad o la representacion de datos multidimensionales. El resultado de este nuevo planteamiento, más rico que el de la cartografía clásica, se conoce como geovisualización.

En este capítulo veremos las ideas fundamentales sobre la visualización de datos, desarrollando la aplicación de estas en la cartografía tradicional, así como en el ámbito de la geovisualización y de los SIG.

Cuando visualizamos cualquier tipo de información geográfica, ya sea a través de un mapa clásico o de algún elemento gráfico en la pantalla de un ordenador, estamos utilizando un lenguaje visual para transmitirla. Del mismo modo que al hablar empleamos un lenguaje oral y al escribir un lenguaje escrito, siempre que plasmemos la información geográfica en una serie de elementos visuales estaremos empleando este lenguaje visual.

El estudio de los signos de un lenguaje constituye lo que se conoce como semiología. En el caso de los elementos del lenguaje visual, encontramos una semiología gráfica. Esta semiología trata los signos del lenguaje visual y la gramática de estos, definiendo una lingüística visual que nos ayuda a comprender cómo una representación gráfica dada cumple su propósito de transmitir la información en base a la cual se crea.

Las variables visuales

Existen diversas propiedades de los elementos visuales que podemos emplear para trasnmitir una información, siendo más adecuadas unas u otras según sea la circunstancia.

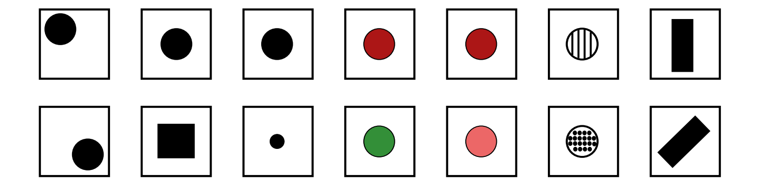


Figura 9.1: Ejemplo de uso de las distintas variables visuales. De izquierda a derecha: posición, forma, tamaño, tono, valor, textura, y orientación

Estas propiedades conforman lo que se conoce como variables visuales, y se aplican a los elementos básicos de la representación, que son aquellos objetos geométricos de que se compone

esta. Las variables visuales permiten diferenciar unos de otros y asignarles unas ciertas características, susceptibles a su vez de ser interpretadas junto al propio significado que el objeto pueda tener. Dados dos elementos, estos pueden diferenciarse por las siguientes variables, que aparecen representadas en la figura 9.1: Posición, forma, tamaño, textura, color y orientación

El uso de la posición está muy restringido en el caso de un mapa, por deber respetarse el emplazamiento real en el espacio del elemento representado, y por ello y no se emplea.

La forma viene definida por el perímetro exterior del objeto. La forma se aplica fundamentalmente a los símbolos puntuales, situando un símbolo de una forma dada sobre las coordenadas exactas del punto a representar. Su aplicación a símbolos lineales es difícil y no se da, mientras que en el caso de aplicarse sobre símbolos de superficie requiere la alteración de los polígonos representados (por ejemplo, que tracen los límites de países), dando lugar a una representación imprecisa, al menos en lo que al contorno del polígono respecta.

El tamaño se refiere a la dimensión del símbolo. Para el caso de símbolos puntuales, puede aplicarse sin más que hacer más grande o pequeño el símbolo en sí. En el caso de líneas, el grosor de estas constituye la forma de aplicar la variable tamaño. No se usa en símbolos superficiales, salvo aplicándolo sobre la textura de relleno.

El tamaño condiciona la percepción de otras variables visuales, especialmente cuando se trata de tamaños pequeños.

La textura hace referencia al relleno de un símbolo mediante algún patrón. Se aplica en lineas mediante el uso de guiones y espacios en blanco que dan lugar a un patrón de discontinuidad, aunque su uso principal es en el caso de símbolos de superficie.

El color es la más importante de todas las variables visuales, debido a las posibilidades que ofrece.

Dos son las componentes de un color que se utilizan como variables visuales, y que pueden entenderse como tales por si mismas: el tono y el valor.

El tono es lo que en el lenguaje común denominaríamos color, es decir el nombre del color, por ejemplo verde, rojo o amarillo.

El tono puede verse alterado por los tonos del entorno, especialmente en símbolos de pequeño tamaño. Aunque es una variable para la que la percepción humana tiene gran sensibilidad, en los símbolos pequeños puede ser difícil de identificar y pueden producirse una falsa percepción si comparten espacio con otras más grandes de un tono distinto.

Por su parte, el valor indica la claridad del color. Un tono azul puede ser más claro o más oscuro sin dejar de ser azul. Esa variación que se produce es una variación del valor del color.

La capacidad de diferenciar dos símbolos con valor distinto varía en función del tipo de símbolo. Así, es mayor en el caso de símbolos de superficie, mientras que en el caso de símbolos puntuales y lineales está relacionada con el tamaño. Si el punto es muy pequeño o la línea muy delgada, es más difícil apreciar el valor y, por tanto, comparar este con otro o extraer la información que mediante esa variable visual se intenta transmitir.

Por último, la orientación se aplica sobre los símbolos puntuales, siempre que estos no presenten simetrías que impidan percibir correctamente la orientación. Para los símbolos de superficie, se aplica a través de la textura, variando la orientación de esta. No se aplica en el caso de líneas.

Las propiedades de las variables visuales

Se distinguen 4 propiedades básicas que una variable visual puede presentar:

- Asociativa. Una variable visual presenta la propiedad asociativa si al ser aplicada no aumenta ni disminuye la visibilidad

de un elemento. Es decir, cuando en función de esa variable visual no puede asignársele más o menos importancia a este.

- Selectiva. La propiedad selectiva la presentan aquellas variables visuales que, al ser aplicadas, generan distintas categorías de símbolos.
- Ordenada. Cuando una variable visual puede emplearse para representar un orden, se dice que presenta la propiedad ordenada.
- Cuantitativa. Cuando, además del orden, una variable puede mostrar cantidades o proporciones, entonces se dice que posee la propiedad cuantitativa.

En la anterior lista, las propiedades están organizadas según los denominados *niveles de organización*. La propiedad asociativa se sitúa en el nivel más bajo, mientras que la cuantitativa ocupa el más alto. El nivel de organización de las variables visuales tiene importancia a la hora de combinar varias de ellas en un símbolo, como veremos más adelante. Asimismo, el nivel de organización define qué tipo de información podemos transmitir con una variable visual.

La figura 9.2 muestra diferentes representaciones de un conjunto de símbolos puntuales en los que en cada caso se ha utilizado únicamente una variable visual.

Comenzando con la propiedad asociativa, vemos que a excepción del tamaño y el valor, las demás variables visuales no hacen que los elementos presenten una preponderancia en la imagen. No existen una orientación que podamos definir como más importante, ni tampoco un color. Lo mismo sucede con la textura, la forma y la posición.

Con el tamaño, sin embargo, resulta claro que mayor tamaño implica un papel destacado dentro de la información que transmite el mapa. De igual modo, un mayor valor (un color más oscuro) da sensación de mayor definición, y centra la atención de observador sobre el elemento de un modo muy superior a como lo hace un valor bajo.

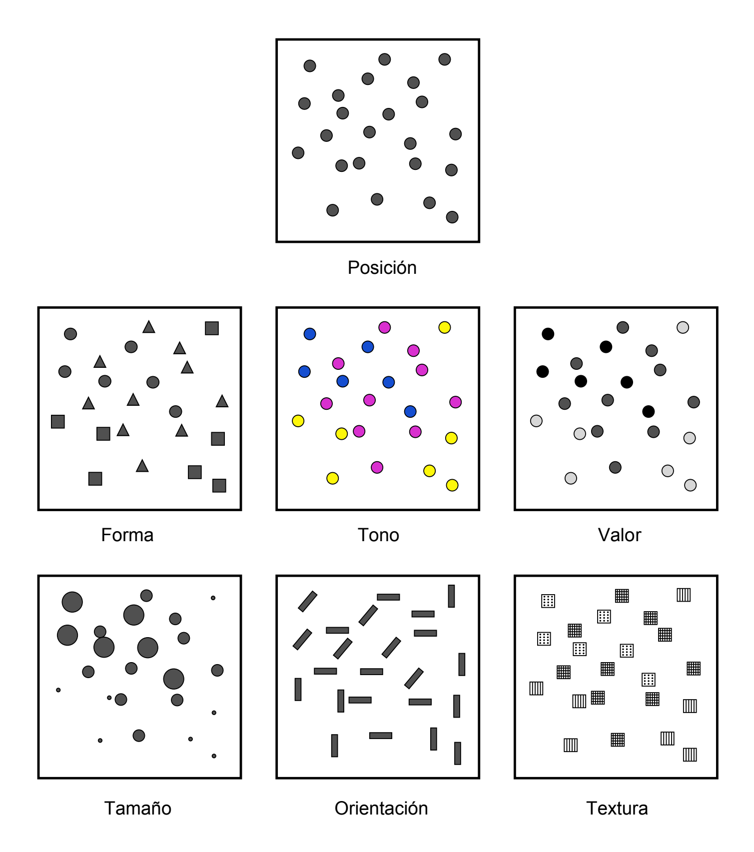


Figura 9.2: Representación de un conjunto de símbolos aplicando de forma individual las distintas variables visuales.

Respecto a la propiedad selectiva, diremos que una variable visual la presenta si de un vistazo podemos rápidamente seleccionar los elementos que pertenecen a un determinado grupo, identificados estos mediante dicha variable visual. El caso más claro de propiedad selectiva lo presenta el tono. Podemos rápidamente quedarnos solo con los elementos amarillos o con los rojos. Aunque no de un modo tan claro, todas las restantes variables presentan igualmente esta propiedad, a excepción de

la forma. La forma no permite que los elementos se agrupen de modo espontáneo en familias, y su validez en este sentido está muy ligada a la complejidad de dicha forma.

La propiedad ordenada la presentan aquellas variables que permiten establecer un orden. Tan solo posición, textura, tamaño y valor la presentan, mientras que las demás carecen de ella. Por ejemplo, en la imagen correspondiente a la variable visual tono no podemos decir cuáles de los elementos situaríamos al principio y cuáles al final de una escala dada definida por esos tonos. Con el valor, sin embargo, sí que podemos, ya que esta escala iría de los tonos más claros a los más oscuros, y visualmente podemos sin dificultad distinguir los distintos niveles y ordenarlos.

Por último, la propiedad cuantitativa la presentan aquellas variables visuales que permiten estimar proporciones o cantidades de forma visual. Esta propiedad es exclusiva del tamaño y de la posición, mientras que las demás no la presentan. Podemos por, ejemplo ver que los círculos grandes en la figura correspondiente son aproximadamente el doble que los pequeños.

En el cuadro 9 se muestra un resumen de todo lo anterior.

	Posición	Tamaño	Forma	Valor	Tono	Textura	Orientación
Asociativa	◊	-	◊	-	◊	◊	◊
Selectiva	◊	◊	-	◊	◊	◊	◊
Ordenada	◊	◊	-	◊	-	-	-
Cuantitativa	◊	◊	-	-	-	-	-

Cuadro 9.1: Cuadro resumen con las propiedades de las variables visuales.

Las variables visuales pueden combinarse (por ejemplo representando elementos con puntos de distinto tamaño y tono).

Al hacerlo, deben tenerse en cuenta las propiedades de estas del mismo modo que cuando se emplean de forma individual. Las propiedades a reforzar serán aquellas que convengan más al tipo de información representado, y deben presentarlas todas las variables a combinar para que el efecto conjunto sea más acusado.

La percepción de las variables visuales

La percepción de las variables puede verse alterada por el medio. Es importante estudiar esta alteración desde dos puntos de vista: la constancia perceptiva (hasta qué punto podemos modificar los elementos visuales o su entorno sin que dejen de transmitir su información y se confundan sus características) y las ayudas a la percepción (cómo podemos facilitar que se perciban exactamente como pretendemos)

Entendemos por constancias perceptivas a las propiedades de los objetos cuya percepción no varía aunque se produzcan modificaciones. Por ejemplo, dado un objeto redondo tal como una rueda, si lo miramos en una dirección perpendicular aparecerá efectivamente como una forma circular perfecta. Sin embargo, si la miramos desde otro ángulo, veremos una forma elíptica, pero ello no nos lleva a pensar que la rueda en sí no sea ya redonda. Este ejemplo muestra la constancia perceptiva de la forma.

No todas las variables visuales tienen una constancia perceptiva como la anterior. Cuando la percepción de un elemento cambia aunque el estimulo no lo haga, en lugar de una constancia perceptiva hablamos de un contraste perceptivo. Los contrastes perceptivos pueden inducir una interpretación errónea de la información que pretendemos transmitir, al producirse una percepción equivocada.

Las siguientes son algunas de las ideas más importantes a tener en cuenta a este respecto a la hora de crear un mapa:

- El tamaño es la variable visual que más afectada se ve, y el tamaño aparente de un objeto puede variar notablemente si se encuentra rodeado de otros de un tamaño distinto. Es importante tener esto en cuenta a la hora de emplear simbología de elementos puntuales en un mapa.
- El valor se ve igualmente alterado al situar alrededor elementos de distinto valor, especialmente si estos son numerosos.
- El tono se ve alterado por la presencia de otros tonos distintos. En un mapa, veremos este efecto al enfrentar el color de un elemento sobre el color del fondo.
- Tonos complementarios puestos juntos pueden crear sensación de vibración en la frontera que los separa.

En lo que respecta a las ayudas a la percepción, el factor más importante en la creación de un mapa es una correcta separación entre el fondo y la figura. Dentro de los distintos elementos o niveles de un mapa (que se corresponderán en líneas generales con las capas que se empleen en el SIG para crearlo), se han de emplear las propiedades de las variables visuales para restar importancia visual a aquellas que tengan menos relevancia, y de este modo centrar la atención sobre la información que se desea transmitir por encima de las demás.

Para destacar ciertas capas en el mapa, es necesario establecer una adecuada jerarquización. Esta jerarquía debe aportar una «profundidad» a la información, de forma que existan niveles en esta y se perciba que algunos elementos están por encima de otros. La forma de ordenar las distintas capas en un SIG ya establece un orden, aunque este no es en sí suficiente, y deben utilizarse las variables visuales para enfatizar o no unas o otras capas y la información que contienen.

Como ejemplo de lo anterior, la figura 9.3 muestra un ejemplo de como una correcta jerarquización es fundamental para crear mapas de calidad.

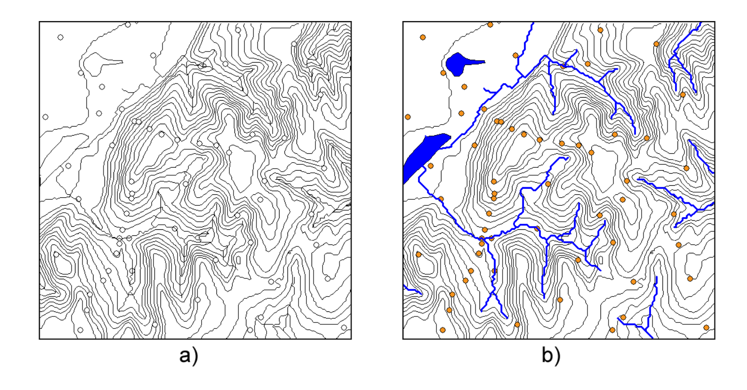


Figura 9.3: Mapa con jerarquía incorrecta (a) y mapa adecuadamente jerarquizado (b).

El mapa y la comunicación cartográfica

El mapa es un medio de comunicación visual que constituye un lenguaje con un objetivo particular: la descripción de relaciones espaciales. Un mapa es, pues, una abstracción simbólica de algún fenómeno real, lo cual significa que presenta un cierto grado de simplificación y generalización.

El lenguaje visual que ya conocemos se convierte ahora en un lenguaje cartográfico al adaptarlo al caso particular de la creación de mapas, y sus reglas son imprescindibles para poder crear cartografía que facilite la labor posterior del usuario. El conjunto de ideas relativas a la producción de mapas dan forma a lo que conocemos como diseño cartográfico.

El diseño cartográfico implica la toma de decisiones por parte del cartógrafo (en este caso el usuario de SIG). Estas decisiones han de estar motivadas fundamentalmente por la utilidad del mapa y el público al que va destinado, y en función de estas han de elegirse aspectos como la proyección a utilizar (no necesariamente la misma en que se encuentran las capas que se van a incluir en el mapa), la escala (dependiendo del nivel de detalle

que se desee comunicar, y siempre dentro de las limitaciones de los propios datos), el tipo de mapa (más adelante en este capítulo detallaremos los tipos más importantes), la cantidad de simplificación que debe realizarse o los símbolos que han de emplearse para plasmar la información a transmitir.

Es importante distinguir entre dos tipos de cartografía: cartografía base, también denominada *fundamental* o *topográfica*, y cartografía temática.

La cartografía base representa el tipo de mapa que originalmente era el objeto principal de la cartografía, cuando lo primordial era recoger con precisión *qué* había sobre la Tierra, documentando a través del documento cartográfico las características físicas de esta.

La cartografía temática se centra en la representación de un tema concreto (una variable espacial dada), pudiendo esta ser de cualquier índole: física, social, política, cultural, etc. Se excluyen de la lista de esos temas posibles a los puramente topográficos, que constituyen el objeto de la cartografía base.

De otro modo, la cartografía topográfica representa elementos físicos del terreno (un accidente geográfico, el curso de un río, el perfil de una costa), mientras que la cartografía temática se centra más en la representación de valores y atributos.

La cartografía temática se apoya en la cartografía base, ya que esta se incluye también en los mapas temáticos para facilitar la comprensión del comportamiento espacial de la variable representada y ubicar esta en un contexto geográfico dentro del propio mapa.

Los tipos de información y su representación

Sabemos ya que la componente temática de la información geográfica puede ser de tipo numérico o alfanumérico, y que la primera se divide en los tipos nominal, ordinal, intervalos y razones. La selección de una forma de simbolización adecuada en

función de la naturaleza de la información es clave para lograr un mapa efectivo. En particular, debe emplearse una variable visual que presente la propiedad (nivel de organización) adecuado.

Por ejemplo, las propiedades asociativa y selectiva solo son de interés para información cualitativa, mientras que el tamaño es la única variable visual con la propiedad cuantitativa, y por tanto la única adecuada para representar razones.

Las siguientes son algunas ideas básicas a este respecto referidas a los distintos tipos antes citados.

- Nominal. La información de tipo nominal se representa adecuadamente utilizando la variable visual forma. Lo que representamos responde principalmente a la pregunta *qué* en lugar de a la pregunta *cuánto*, y está más relacionado en cierto modo con la cartografía base que con la cartografía temática. El uso de símbolos, para elementos puntuales o lineales es una solución muy eficaz y habitual en este caso. Para el caso de representar áreas puede emplearse la variable visual color y emplear distintos tonos, o bien la textura
La información alfanumérica se trata a efectos de representación del mismo modo que la de tipo nominal.
- Ordinal. A diferencia de la información nominal, en la información ordinal los valores definen un orden, por lo que la propiedad ordenada es necesaria para poder aplicarla a este caso.
- Intervalos y razones. Como en el caso anterior, pueden emplearse todas las variables visuales que presenten la propiedad ordenada. No debe olvidarse, no obstante, que la propiedad de mostrar el orden en términos de cantidades o proporciones, que denominábamos cuantitativa, es exclusiva del tamaño, siendo este la variable visual más adecuada para representar correctamente este tipo de información.

Frecuentemente, estos valores son de tipo real (no enteros), por lo que es además necesario agruparlos en clases (intervalos). Esta agrupación puede realizarse según diversas metodologías, siendo las más habituales los intervalos iguales, los intervalos por percentiles, o los intervalos naturales, que tratan de disminuir la varianza de cada clase.

El uso de una u otra metodología puede tener un efecto muy notable en la representación, como se muestra en la figura 9.4.

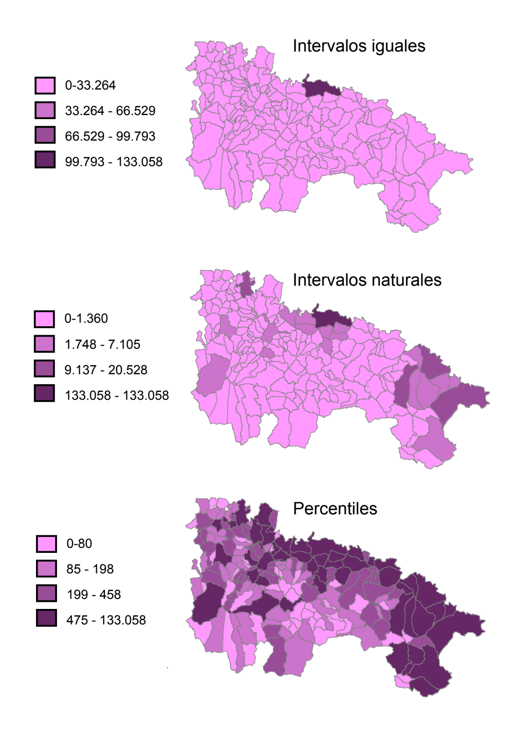


Figura 9.4: Comparación entre distintos esquemas para la creación de intervalos de clase.

Por último, es de interés señalar que, aunque los niveles de organización de las variables visuales expresan a su vez unas posibilidades crecientes (es decir, con una variable como el valor o el tamaño podemos expresar todo lo que el tono puede transmitir, ya que están en un nivel superior), ello no implica necesariamente que el uso de una variable de un nivel superior es mejor que otra de uno inferior. Por ejemplo, el uso del valor para un mapa con información cualitativa no es adecuado . Puesto que el valor tiene la propiedad ordenada, esto puede inducir a pensar que existe algún orden en la variable representada, lo cual es falso.

Elementos del mapa. Composición

Un mapa no es solo lo que se deriva de la representación de la información geográfica y su simbolización, sino un conjunto de elementos dispuestos de forma óptima, siendo uno de ellos aquel que contiene la información geográfica como tal.

Igual de importante que simbolizar correctamente la información geográfica es situar adecuadamente los distintos elementos del mapa, ya que estos están pensados también, al igual que la propia simbología, para facilitar la interpretación de la información y hacer esta más comprensible.

Los siguientes son los elementos fundamentales que podemos emplear para componer un mapa (Figura 9.5):

- Nombre o título. Imprescindible para conocer qué información muestra el mapa.
- Autor. La persona u organismo que ha creado el mapa debe aparecer indicada en algún punto de este.
- Otra información sobre el mapa. Por ejemplo, la relativa al sistema de referencia empleado o la fecha de su creación, entre otras.
- Canevás. El canevás es una retícula que nos indica dónde dentro de la superficie terrestre se encuentra aquello que el mapa

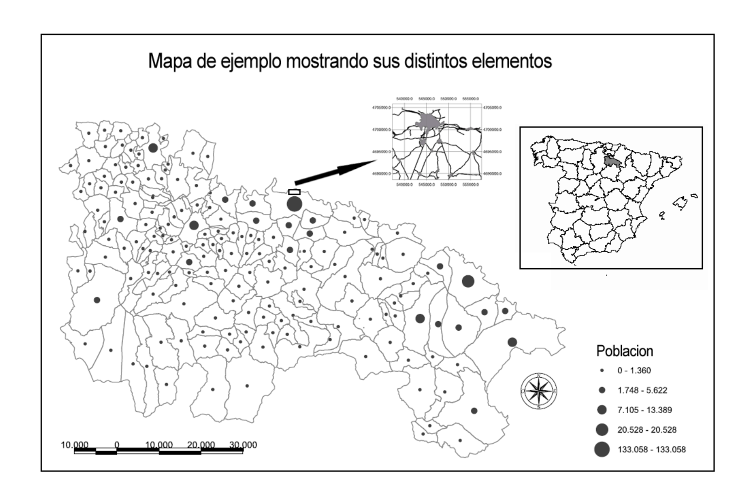


Figura 9.5: Ejemplo de mapa mostrando sus elementos más habituales.

representa, y provee la referencia geográfica para sus elementos. Asimismo, complementa a la escala para la estimación visual de distancias y medidas. Es más necesario en caso de escalas bajas, aunque se añade con independencia de la escala.

- Leyenda. Aunque se ha de tratar de utilizar una simbología lo más expresiva posible, no toda la información puede incorporarse en el mapa, y es necesario acompañarlo de una leyenda. Esta ha de ser también fácil de interpretar y lo más clara posible. Una leyenda demasiado extensa o de difícil comprensión probablemente nos indica que la simbología escogida es mejorable.

  La leyenda y el mapa en sí forman un todo, por lo que no deben separarse mediante un cuadro, salvo en el caso en que el mapa cubra todo el área del lienzo y no sea fácil separar visualmente de forma clara ambos elementos.

- Norte. Aunque habitualmente se presupone la orientación Norte–Sur, no siempre ha de ocurrir así, y una aguja apuntando al norte o una rosa de los vientos sirve para aclarar la orientación del mapa.
- Escala. La escala debe indicarse tanto de forma numérica como gráfica, de modo que puedan realizarse cálculos y estimar visualmente distancias entre puntos dados del mapa.
- Localizador. Un localizador provee un elemento visual para situar el mapa en un contexto geográfico más amplio. Es de especial interés en el caso de series de mapas, para establecer la relación entre el presente y los restantes dentro de la misma serie. En este caso, el localizador sirve como mapa índice.
- Mapas de detalle. Cuando resulta necesario mostrar una cierta zona del mapa con mayor detalle y a una escala mayor, se puede incluir un mapa correspondiente a esa zona como un enclavado dentro del mapa principal. Se debe señalar asimismo sobre este último la zona a la que corresponde el mapa de detalle.

Asimismo, es importante que el diseño del mapa recalque su propósito, haciendo énfasis en los aspectos más relevantes para cumplir este.

Tipos de mapas temáticos

Existen diversas alternativas en función del tipo de elemento que se pretenda simbolizar o las características de la variable tratada, y la elección de una u otra supondrá una diferencia importante en el mapa obtenido y en su uso posterior. En un mismo mapa pueden combinarse varias de estas formas, especialmente si se pretende representar más de una variable, en cuyo caso la combinación debe buscar la máxima claridad en la representación de todas ellas.

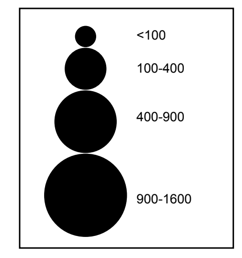
En este apartado detallaremos los siguientes tipos de mapas temáticos: mapas de símbolos proporcionales, mapas de densidad de puntos, mapas de isolíneas y mapas de coropletas. Todos ellos se utilizan para la representación de variables cuantitativas.

Mapas de símbolos proporcionales

Un mapa de símbolos proporcionales representa variables cuantitativas a través de símbolos cuyo tamaño está en relación con el valor a representar de dicha variable. Es decir, emplea la variable visual tamaño (la única con la propiedad cuantitativa) para transmitir el valor de la variable representada. Si el símbolo es lineal, como por ejemplo una barra, el escalado de los símbolos para los distintos valores se realiza utilizando la longitud. Es decir, a un valor doble le corresponde una barra del doble de longitud. En el caso de símbolos de superficie, se emplea la superficie. Por ejemplo, en el caso de usar círculos, a un valor doble no le corresponde un circulo de radio doble, sino uno de área doble.

El escalado de símbolos se puede dar de forma continua, aunque resulta más conveniente efectuar un escalado discreto, creando clases y asignando a cada una de ellas un único tamaño.

Para evitar problemas de percepción del tamaño, es importante mostrar en la leyenda la relación entre los distintos tamaños de los símbolos y sus valores, como se muestra en la figura 9.6



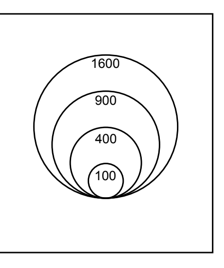


Figura 9.6: Dos ejemplos de leyendas para un mapa de símbolos proporcionales.

Mapas de puntos

Los mapas de puntos se emplean especialmente para variables que representan algún tipo de cantidad, tales como la población, el gasto medio por persona o la producción de un determinado cultivo. Estas cantidades se representan mediante la repetición de puntos, en numero proporcional a su magnitud. Cada uno de esos puntos representa un valor unitario, y el conjunto de ellos sobre la zona en cuestión suma la cantidad total a representar. Los puntos tienen todos la misma forma y tamaño, a diferencia de lo que vimos en el caso de los símbolos proporcionales. Son especialmente adecuados para variables discretas (valores enteros)

Tres son los aspectos que deben tenerse en cuenta a la hora de elaborar un mapa de puntos: el valor de cada punto (es decir, cuántas unidades de la variable representa cada punto), su tamaño y su posición.

El valor de cada punto se debe establecer en función de los valores mínimo y máximo de la variable, para que resulte en un mapa en el que los puntos no aparezcan en demasía o sean demasiado escasos. Este valor se representará en la leyenda para su interpretación, habitualmente en forma de texto, escribiendo por ejemplo, que «un punto equivale a 1000 habitantes».

La elección del tamaño del punto debe garantizar la buena visibilidad de este, al tiempo que no debe ser excesivamente grande para que no ocupe demasiado espacio y dificulte la visión de otros. El tamaño óptimo está en relación con el valor unitario escogido, y ambos parámetros deben establecerse conjuntamente para lograr la combinación más adecuada.

La posición del punto es de gran importancia para transmitir la información correcta y no dar lugar ambigüedades o incorporar errores conceptuales. Si no disponemos de información adicional y solo tenemos el valor correspondiente a una

zona dada, los puntos se han de disponer de forma regular ocupando toda la superficie de la zona. Si, por el contrario, sabemos algo más acerca de la distribución de la variable, debemos emplear esa información para emplazarlos de forma más realista. Si, por ejemplo, la zona corresponde a una provincia y sabemos la localización de la principal ciudad dentro de ella, es más lógico situar más puntos cerca del emplazamiento de esa ciudad que en otras partes de la provincia, ya que una mayor parte de la población estará allí.

Otro aspecto a considerar es el significado de la variable que se representa y la posibilidad o no de que aparezca en las distintas localizaciones de los puntos. Si la variable es, por ejemplo, el numero de ejemplares avistados de un determinado ave acuática, situar los puntos sobre zonas urbanas o de bosque no tiene sentido, ya que dan a entender que ahí hay presencia de esa especie (tantos ejemplares como los puntos en cuestión indiquen), algo que es falso.

La imagen 9.7 muestra un ejemplo de un mapa de puntos.



Figura 9.7: Mapa de puntos.

Mapas de isolíneas

Los mapas de isolíneas son muy utilizados para la representación de variables continuas. Se combinan adecuadamente con otros tipos de mapas, ya que, al representarse únicamente mediante líneas, permite la presencia de otros elementos dentro del mapa sin resultar obstrusiva.

Un mapa de isolíneas está formado por un conjunto de líneas, cada una de las cuales une puntos que presentan el mismo valor de la variable. Estas líneas no pueden cruzarse, ya que ello significaría que en un punto se presentan dos valores. El caso más típico de mapa de isolíneas son las curvas de nivel que aparecen el un mapa topográfico, indicando la elevación del terreno.

La representación de isolíneas viene definida por la denominada equidistancia, que indica la diferencia entre los valores de dos isolíneas contiguas. Una menor equidistancia implica un mayor número de isolíneas y una representación más densa.

La variable visual tamaño es la única que suele emplearse para simbolizar isolíneas, en particular para señalar aquellas líneas que representan un valor múltiplo de una determinada cantidad y hacer así más fácil la lectura del mapa. Estas líneas son lo que se conoce como curvas directrices.

Las líneas se etiquetan con el valor que representan (con texto sobre la línea), y se aprovecha el hecho de que dos líneas consecutivas están separadas siempre por una magnitud igual a la equidistancia, lo cual aporta un importante contexto en lo que a los valores se refiere.

Una forma particular de representar las isolíneas mediante color es hacerlo no sobre las líneas, sino sobre las zonas que median entre ellas. Es decir, representar la clase en lugar del límite de clase. Este tipo de mapas se asemeja al mapa de coropletas (que veremos seguidamente), tratándose más de un mapa de

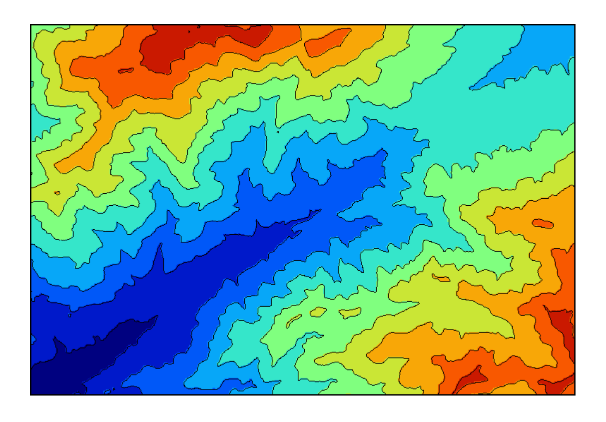


Figura 9.8: Mapa de isolíneas. Se ha empleado para su representación tanto las líneas como el coloreado de las franjas entre estas.

áreas que de líneas, por lo que se conoce como de *isocoropletas*. Ambos tipos de representación, mediante áreas y mediante líneas, pueden combinarse en un único mapa.

En la figura 9.8 puede verse un ejemplo de mapa de isolíneas combinando las dos formas anteriores.

Mapas de coropletas

Los mapas de coropletas son utilizados habitualmente para representar la información geográfica en un SIG. Por ejemplo, los mapas de la figura 9.4 son todos ellos mapas de coropletas.

En un mapa de coropletas se tiene una serie de áreas definidas, cada una de las cuales posee un valor de una variable. Este valor de la variable afecta a todo el área y es el que se representa por medio de alguna variable visual, normalmente el color a través de su componente valor.

Los mapas de coropletas adolecen de ciertos inconvenientes, siendo los principales la sensación de cambio brusco en los límites entre áreas, la cual puede transmitir la idea de que en esa

frontera los valores de la variable cambian bruscamente, ocultando la continuidad de la variable en caso de existir esta, y la homogeneidad dentro de cada área, que puede no ser cierta.

Para transmitir correctamente la información, es importante normalizar la variable en función de la superficie de cada unidad. Por ejemplo, en el caso de representar la población de una serie de términos municipales, es más adecuado representar la población por unidad de área, dividiendo el valor de población cada unidad entre la superficie de esta.

La visualización en un SIG

Una vez que conocemos los conceptos básicos sobre representación gráfica y su uso para la elaboración de mapas, es momento de ver cómo estos se aplican en el contexto de un SIG. Dos aspectos son especialmente relevantes a este respecto: el hecho de contar con múltiples capas que han de representarse conjuntamente, y las particularidades de la representación en pantalla, con la interactividad que el SIG ofrece.

Combinación de capas

En general, una capa aislada no constituye la forma óptima de visualizar esta. Si en un mapa encontramos elementos variados, ello no obedece a la mera economía de espacio, sino a que añadir información adicional a la de esa capa que queremos representar nos ayuda a entenderla mejor. Los procesos que tienen lugar en el espacio están relacionados unos con otros, y visualizar esas relaciones aporta una mayor riqueza a la visualización, haciendo que sea más sencillo extraer la información contenida en ella.

Aunque sencillo de llevar a cabo en lo que a manejo del SIG respecta, combinar capas es un proceso que también debe

realizarse con conocimiento y en el que, si se realiza correctamente, las diferencias pueden ser notables. No solo se trata de dar espacio dentro del mapa a toda la información que esas capas contienen, sino que exista una sinergia entre ellas en la medida de lo posible, para que se complementen mutuamente como partes de un conjunto.

La configuración fundamental en este sentido es el orden de las capas, que indica cómo se disponen estas las unas sobre las otras y define el orden de pintado. Si una misma zona está ocupada por elementos de varias capas, solo serán visibles los correspondientes a la capa superior, ya que la representación de los pertenecientes a las demás quedará oculta.

Sabemos que las capas ráster llenan todo el espacio y contienen valores en todas sus celdas (o píxeles en el caso de imágenes). Por ello, van a tapar lo que se sitúe por debajo de ellas y no resulta buena idea situarlas en lo alto del orden de pintado. En su lugar, se deben considerar como capas base sobre las que situar las restantes, de tal modo que no impidan a estas visualizarse correctamente.

Con un razonamiento similar, podemos establecer la mejor forma de ordenar las capas vectoriales, situando por norma general los polígonos y encima de estos las líneas y los puntos respectivamente.

En ocasiones, un determinado orden viene impuesto por el significado que tienen las capas. Por ejemplo, si nuestro mapa contiene una capa con la red de drenaje y otra con carreteras, lo lógico y habitual es que las carreteras estén por encima de los ríos, ya que lo normal es que pasen por encima de estos y no al contrario.

Una funcionalidad de que disponen los SIG para la combinación de capas es el uso de transparencias totales o parciales. Estas se pueden aplicar tanto a capas ráster como vectoriales, de forma que puede verse a través de ellas y así presentar la información de otras capas que se encuentren por debajo. Por

ejemplo, la representación mostrada en la figura 9.9 hace uso de esta técnica. El polígono que delimita la cuenca vertiente es semi–transparente, de tal modo que la capa de relieve sombreado que está debajo puede verse, dando la sensación de que sigue ese relieve.

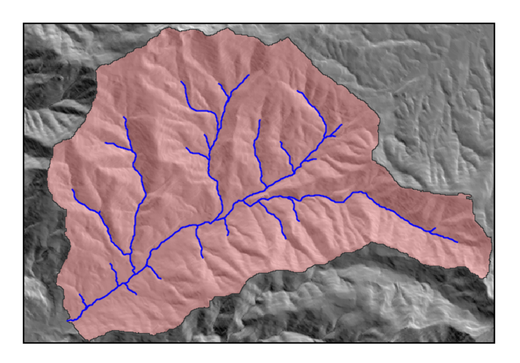


Figura 9.9: Combinación de capas mediante transparencia.

En el caso de una capa ráster, puede aplicarse una transparencia parcial, haciendo que determinadas partes de esta no se representen, en función de sus valores.

En el caso en que una variable se encuentre dividida en varias capas (división horizontal), debe asignarse una misma simbología a todas esas capas, con el fin de que la representación sea coherente.

Particularidades de la representación en pantalla

Tanto para las representaciones en papel como para las representaciones en pantalla se siguen unos mismos principios a la hora de diseñarlas, pero estas últimas presentan algunas características particulares que hacen necesario tener en consideración otros factores.

Podemos distinguir dos bloques fundamentales de diferencias que hacen que un mapa pensado para ser visualizado en la

pantalla mientras ejecutamos un SIG no deba diseñarse exactamente igual que si estuviera pensado exclusivamente para ser utilizado en un soporte impreso: la baja resolución de la pantalla y la interactividad de la propia representación.

A la hora de preparar cartografía impresa, la resolución no es un problema, ya que las capacidades de que se dispone superan a las necesidades que el cartógrafo puede tener. En la pantalla, sin embargo, algunos elementos pueden no aparecer con suficiente claridad y, aunque en papel cumplan su función correctamente, es conveniente sustituirlos por otros más adecuados cuando no se trabaja sobre un medio impreso. Entre los elementos a evitar se encuentran las fuentes con ornamentos tales como sombreados, las fuentes con serifas (pequeños adornos al final de las líneas para facilitar la lectura) o los rellenos o punteados de paso muy fino.

Respecto a la interactividad de las representaciones, debe tenerse presente que, a diferencia de un mapa impreso, en un SIG lo que vemos no es un elemento estático, sino dinámico. En este contexto, *dinámico* no quiere decir que el mapa cambie o que represente un proceso dinámico, sino que el usuario puede alterarlo utilizando por lo menos las herramientas más fundamentales que proporcionan interactividad, tales como el desplazamiento, el acercamiento o el alejamiento.

Por ejemplo, el hecho de que la escala de la representación pueda variar según la voluntad del usuario puede causar problemas con algunos de sus elementos tales como símbolos o etiquetas de texto. Si todos los elementos del mapa se escalan proporcionalmente, una reducción importante de escala disminuirá el tamaño del texto hasta hacerlo ilegible. Por el contrario, si aumentamos la escala el tamaño puede ser excesivo. La figura 9.10 muestra este hecho.

Una solución a esto es especificar un tamaño absoluto de estos elementos que no varíe con la escala. Es decir, que un símbolo o una etiqueta de texto tengan siempre el mismo tamaño

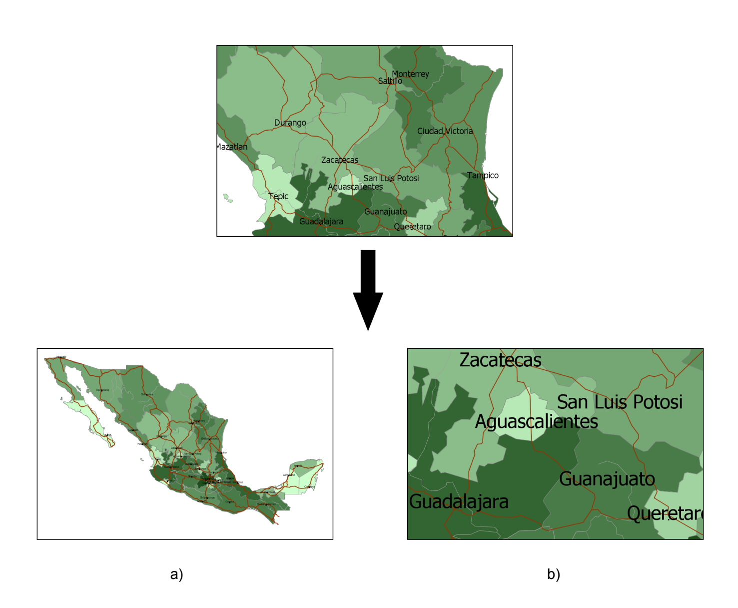


Figura 9.10: El cambio de escala varía el tamaño de los símbolos tales como las etiquetas, haciéndolos demasiado pequeños (a) o demasiado grandes (b)

en pantalla y ocupen los mismos píxeles. A escalas bajas, sin embargo, este método puede dar lugar a representaciones saturadas, como se observa en la figura 9.11.

La posibilidad de representar capas a distintas escalas, puede también dar lugar a problemas de rendimiento. Para evitar estos, se recomienda un planteamiento multi–escalar en el que, según la escala, se visualicen unas u otras capas, así como trabajar con capas de menor detalle a escalas pequeñas



Figura 9.11: Representación saturada al representar elementos con tamaño fijo a una escala baja.

Índice general